R. FAUCHER

PHYSIQUE

2nde C & M

HATIER

R. FAUCHER
Professeur agrégé au Lycée Louis-le-Grand

PHYSIQUE

CLASSE DE SECONDE
SECTIONS C et M
A' C' M'

NOUVELLE ÉDITION
PROGRAMME 1957

LIBRAIRIE A. HATIER, 8, RUE D'ASSAS, PARIS-VI^e^
© Hatier 1958

Programme du 19 juillet 1957

B. O. N° 30 (25-7-57)

CLASSE DE SECONDE

Sections A', C, C', M et M'

Divers états de la matière; exemples familiers.

Pesanteur. — Poids d'un corps; verticale; mesure d'un poids par l'allongement d'un ressort, dynamomètres, unités. Existence du centre de gravité (1). Variation du poids d'un corps avec le lieu. Invariance de la masse.

Force. — Étude expérimentale des forces concourantes et des forces parallèles appliquées à un solide; règle de composition et de décomposition, résultante.

Équilibre d'un corps solide reposant sur un plan horizontal.

Équilibre d'un corps solide mobile autour d'un axe. Moment d'une force par rapport à un axe dans les seuls cas particuliers où la force est orthogonale à l'axe ou parallèle à l'axe.

Notion expérimentale de couple.

Usage de la balance, définition pratique et étude expérimentale de ses qualités (1).

Masse volumique d'un solide, d'un liquide, sa détermination (1).

Travail et puissance. — Travail d'une force constante en grandeur et direction; définition dans les divers cas; unités.

Puissance; unités.

Machines simples : poulie fixe; poulie mobile; plan incliné; treuil; levier. Forces sur les points d'appui.

Notion de pression; unités.

Statique des fluides. — Force exercée par un fluide en équilibre sur une portion de paroi; pression en un point d'un fluide. Existence de la pression atmosphérique.

Différence de pression entre deux points d'un fluide en équilibre : étude expérimentale de la variation de pression avec la profondeur; conséquence et applications.

Poussée d'Archimède; application aux corps flottants (les applications à la détermination des masses volumiques et aux densimètres seront étudiées uniquement en travaux pratiques).

Mesure de la pression atmosphérique; principe du baromètre à mercure et du baromètre métallique.

Principe du manomètre à air libre et du manomètre métallique.

Chaleur. — Expérience qualitative sur les dilatations. Température. Usage du thermomètre à mercure (2).

Définition du coefficient linéaire et du coefficient cubique de dilatation des solides. Dilatation apparente et dilatation absolue d'un liquide; définition du coefficient cubique de dilatation absolue d'un liquide (3). Variation de la masse volumique avec la température.

Compressibilité des gaz; loi de Mariotte.

Dilatation des gaz à pression constante et variation de pression à volume constant; relation $pv/1 + \alpha t$ = constante et pv/T = constante.

Masse volumique d'un gaz; densité par rapport à l'air.

Notion de quantité de chaleur; unités, principe de la méthode des mélanges.

Chaleur massique des solides et des liquides (les mesures de ces grandeurs ne seront étudiées qu'en travaux pratiques).

Définition des changements d'état d'un corps pur. Étude de la vaporisation; pression maximum; définition de la chaleur de vaporisation.

---

(1) La question définie par la phrase qui précède (d'un point à un autre)ne sera étudiée qu'en travaux pratiques; d'une manière générale, les notions sur les erreurs seront étudiées en travaux pratiques.

(2) La question définie par la phrase qui précède (d'un point à un autre) ne sera étudiée qu'en travaux pratiques

(3) La mesure des coefficients de dilatation n'est pas au programme.

PROGRAMME

DU 19 JUILLET 1957

PHYSIQUE - Classe de seconde (Sections A et B)

Divers états de la matière ; exemples familiers.

PESANTEUR — Poids d'un corps ; verticale. Mesure du poids d'un corps par l'allongement d'un ressort ; unités. Existence du centre de gravité (*).
Variation du poids d'un corps avec le lieu ; invariance de la masse.

FORCE — Étude expérimentale des forces concourantes et des forces parallèles appliquées à un solide ; règles de composition et de décomposition, résultante. Notion expérimentale de couple.
Usage de la balance ; définition pratique et étude expérimentale de ses qualités (*).
Masse volumique d'un solide, d'un liquide (*).

TRAVAIL ET PUISSANCE — Notion de travail et de puissance ; unités.
Notion de pression ; unités.

STATIQUE DES FLUIDES — Force excercée par un fluide en équilibre sur une portion de paroi ; pression en un point d'un fluide. Existence de la pression atmosphérique.
Différence de pression entre deux points d'un fluide en équilibre ; applications, mesure d'une pression par une colonne liquide, principe du baromètre à mercure.

CHALEUR — Expériences qualitatives sur les dilatations. Température. Usage du thermomètre à mercure (*).
Compressibilité des gaz ; loi de Mariotte. Variation du produit *pv* avec la température.
Définition de la masse volumique d'un gaz ; densité par rapport à l'air.
Notion de quantité de chaleur ; unités ; principe de la méthode des mélanges.
Définition des changements d'état d'un corps pur.

En vue d'une utilisation de l'ouvrage de Physique Seconde C M A' C' M' par les sections de Seconde A et B, il convient de se limiter au CADRE suivant, avec un choix d'exercices de difficulté moyenne.

Leçon 1 - Conservée sans changement.
» 2 - Suppression des §§ 5 et 10.
» 3 - Sans changement.
» 4 - Suppression du § 7.
» 5 - Suppression des §§ 5 à 11 inclus.
» 6 - Sans changement.
» 7 - Suppression totale de la leçon.
» 8 - Sans changement.
» 9 - Etude pratique de la balance à faire seulement en T.P.
» 10 - Sans changement.
» 11 - Sans changement.
» 12 - Sans changement.
» 13 - Conserver les §§ 1, 3, 4, 7.
Leçon 14 - Conserver les §§ 1, 2, 3, 10, 11, 12, 13.
» 15 - Conserver les §§ 1, 2, 3, 5.
» 16 - Sans changement.
» 17 - Conserver les §§ 2, 4.
» 18 - Conserver les §§ 1, 3, 4.
» 19 - Suppression des §§ 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17.
» 20 - Suppression totale de la leçon.
» 21 - Sans changemennt.
» 22 - Supprimer les §§ 6 et 10
» 23 - Suppression des §§ 8, 9, 13, 14.
» 24 - **Changements d'état.** Conserver seulement le texte de la page 292.

La question définie par la phrase qui précède (d'un point à un autre) ne sera étudiée qu'en travaux pratiques. D'une manière générale, les notions sur les erreurs seront étudiées en travaux pratiques.

AVERTISSEMENT

Le programme de Physique du 19 juillet 1957 est marqué, pour les sections scientifiques de la Classe de Seconde, par plusieurs modifications appréciables.

Une place plus importante est réservée à la *Mécanique*. Les éléments de *Statique* se trouvent maintenant renforcés par l'introduction officielle du *moment d'une force* et de *l'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe*. En se limitant aux forces orthogonales ou parallèles à l'axe et en introduisant ces notions par leur côté expérimental, cette acquisition est bien à la portée des élèves de Seconde. C'est l'occasion de faire apparaître les *couples*, de rendre familiers leurs caractères essentiels, les unités, leur rôle pratique dans tout ce qui peut tourner. Les classes terminales scientifiques ne devraient plus désormais nécessiter cet apprentissage tardif qui commande cependant un enseignement efficace de la *Dynamique des rotations*. En insistant sur ces questions, en y revenant souvent par la suite, nous espérons entraîner la conviction qu'un ressort allongé et un fil tordu offrent deux aspects différents d'un même phénomène.

Nous avons naturellement introduit les *unités du système M. K. S.* dont l'adoption va simplifier largement tout l'enseignement. La priorité leur est donnée dans les définitions et dans de nombreux calculs, mais il a paru nécessaire de conserver la liaison avec les autres unités très employées encore et peut-être pour longtemps dans la vie courante; l'*Hydrostatique* scolaire s'accommode encore mal du newton par mètre carré comme unité de pression.

Il faut aussi acquérir une notion " utilisable " de la *masse* d'un corps, même si elle doit ignorer l'aspect dynamique. Faisant de la *force*, donnée sensible concrète, le point de départ de la *Mécanique*, le *poids* n'étant qu'une force particulière importante mais non fondamentale, nous avons pensé qu'il n'était pas nécessaire d'enregistrer dès le début, au cours d'un même chapitre, deux notions aussi délicates à distinguer que le *poids* et la *masse*. Or les sept premières leçons (*machines simples comprises*) n'ont pas besoin de la masse, mais l'étude de la *balance* (leçon 9) ne peut se faire correctement sans elle. Nous avons donc consacré la huitième leçon à cette importante nouveauté. Par la suite l'élève est si souvent amené à distinguer *poids* et *masse* dans ses raisonnements et ses calculs que l'existence de la masse statique s'impose peu à peu à lui, même si, au début, toutes les difficultés n'ont pu être levées.

Conformément à l'esprit du nouveau programme nous avons condensé l'étude des *dilatations* (solides et liquides) en une seule leçon.

Dans l'étude des *lois des gaz* l'emploi de la température absolue est au moins aussi commode que celui de la température Celsius; il a été généralisé.

Bien que la *fusion* ne figure plus explicitement au programme, un chapitre, allégé, lui a été consacré. Pour définir et analyser l'équilibre entre deux phases d'un même corps pur, la fusion, plus que la vaporisation, a le mérite de la simplicité expérimentale.

Plusieurs questions doivent être étudiées en Travaux Pratiques : *usage de la balance, du thermomètre à mercure, diverses mesures*. Là où l'équipement des locaux et l'abondance du matériel le permettent, on peut compter, avec les classes-laboratoires, sur un moyen d'enseignement excellent quand il est parfaitement organisé. Il paraît utile cependant, même dans ce cas, que l'élève puisse trouver dans son livre avant, pendant, ou après une séance de Travaux Pratiques, un guide assez complet pour décrire les appareils-types, assez précis pour en discuter le principe et le mode d'emploi, assez pratique pour aider la manipulation. Les parties correspondantes s'inscrivent donc dans des leçons complètes et sont signalées en marge du texte, par un trait interrompu.

Chacune des leçons se termine par de nombreux *exercices* et comporte deux ou trois *problèmes* dont la rédaction s'inspire d'un double souci : obtenir une vue synthétique du chapitre étudié et faire une revision, toujours si utile, des connaissances acquises dans les chapitres précédents. A la fin de l'ouvrage sont rassemblés et classés d'autres problèmes.

En confrontant cette nouvelle édition et l'ancienne, et en tenant compte de la rénovation des programmes, nous ne pensons pas avoir alourdi le livre, ni accru sa difficulté. Nous remercions d'avance ceux de nos collègues qui, par leurs remarques et suggestions, nous feront profiter de leur expérience et nous aideront ainsi à l'améliorer.

R. F.

RAPPEL DE MATHÉMATIQUES

La *Classe de Troisième* fait acquérir en Mathématiques des notions dont la connaissance est nécessaire pour aborder avec fruit le programme de Physique de la *Classe de Seconde.* Nous rassemblerons les résultats en quelques pages.

A. MESURES DES ANGLES

En Physique les unités les plus employées sont :

1. LE DEGRÉ.

Définition : *le degré (abréviation : °) est égal à 1/90 de l'angle droit.*
Une circonférence entière correspond à 4 droits, donc à 360 degrés.

Au degré se rattachent :

— la ***minute sexagésimale (') :*** $1^\circ = 60'$

— la ***seconde sexagésimale (") :*** $1' = 60''$.

2. LE RADIAN.

Définition : *Le radian (rad) est la mesure d'un angle au centre qui intercepte sur une circonférence un arc égal au rayon.*

La longueur de la circonférence de rayon R étant $2\pi R$, une circonférence entière correspond donc à $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ radians.

Relation degré-radian. — On calcule aisément que : ***1 rad ≃ 57°30'.***

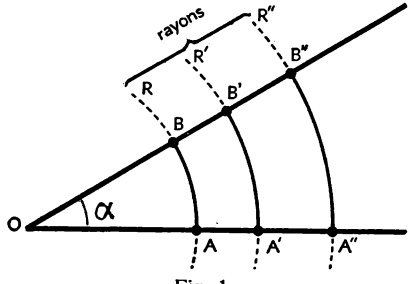


Fig. 1.

3. CONSÉQUENCE DE LA DÉFINITION DU RADIAN. — Soient plusieurs circonférences concentriques de rayons **R, R', R''...** (fig. 1), et un angle au centre commun α.

Exprimer α en radians, c'est chercher combien de fois la longueur d'un arc, ($\overset{\frown}{AB}$ par exemple), contient le rayon correspondant (R) exprimé avec la même unité de longueur. La mesure de α est donc donnée par les rapports :

$$\frac{\widehat{AB}}{R}, \quad \text{ou} \quad \frac{\widehat{A'B'}}{R'}, \quad \text{ou} \quad \frac{\widehat{A''B''}}{R''};$$

ce qui s'écrit : $$\alpha_{\text{radians}} = \frac{\widehat{AB}}{R} = \frac{\widehat{A'B'}}{R'} = \frac{\widehat{A''B''}}{R''}$$

ou, d'une façon très générale :

$$\widehat{AB} = R \times \alpha$$

arc — rayon — angle au centre

même unité de longueur — en **radians**

B. LIGNES TRIGONOMÉTRIQUES

4. DÉFINITIONS. Traçons le *cercle trigonométrique*, de centre **O**, de rayon égal à l'*unité*, et deux axes de coordonnées rectangulaires **Ox** et **Oy** (fig. 2).

Soit un angle α, qui intercepte l'arc $\widehat{AM}$, mesuré à partir du point **A** comme origine.

Définition du sinus. — On désigne sous le nom de *sinus* de l'angle α ($\sin\alpha$) l'ordonnée $\overline{OS}$ du point M.

$$\sin\alpha = \overline{OS}.$$

Définition du cosinus. — On désigne sous le nom de *cosinus* de l'angle α ($\cos\alpha$) l'abscisse OC du point M.

$$\cos\alpha = \overline{OC}.$$

Définition de la tangente. — On désigne sous le nom de *tangente* de l'angle α ($\text{tg}\alpha$) l'ordonnée du point T, intersection de la droite OM avec l'axe Az parallèle à O*y* et orienté dans le même sens que O*y*.

$$\text{tg}\alpha = \overline{AT}.$$

Des définitions précédentes, il résulte que, α prenant toutes les valeurs comprises entre O et π radians (180°) :

$\sin\alpha$ varie de 0 à + 1
$\cos\alpha$ varie de + 1 à — 1
$\text{tg}\alpha$ varie de — ∞ à + ∞

5. RELATIONS ENTRE SINUS, COSINUS, TANGENTE. On démontre que, pour un angle α donné :

$$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$$

$$\text{tg}\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}.$$

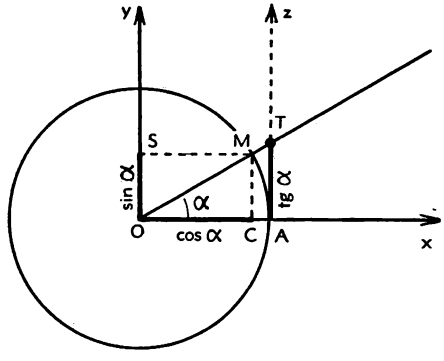


Fig. 2.

6. RAPPORTS TRIGONOMÉTRIQUES NATURELS.

angles		sin	tg		cos		
degrés	radians						
0	0,0000	0,0000	0,0000	∞	1,0000	1,5708	90
1	0,0175	0,0175	0,0175	57,29	0,9998	1,5533	89
2	0,0349	0,0349	0,0349	28,64	0,9994	1,5359	88
3	0,0524	0,0523	0,0524	19,08	0,9986	1,5184	87
4	0,0698	0,0698	0,0699	14,30	0,9976	1,5010	86
5	0,0873	0,0872	0,0875	11,43	0,9962	1,4835	85
6	0,1047	0,1045	0,1051	9,514	0,9945	1,4661	84
7	0,1222	0,1219	1,1228	8,144	0,9925	1,4486	83
8	0,1396	0,1392	0,1405	7,115	0,9903	1,4312	82
9	0,1571	0,1564	0,1584	6,314	0,9877	1,4137	81
10	0,1745	0,1736	0,1763	5,671	0,9848	1,3963	80
11	0,1920	0,1908	0,1944	5,145	0,9816	1,3788	79
12	0,2094	0,2079	0,2126	4,705	0,9781	1,3614	78
13	0,2269	0,2250	0,2309	4,331	0,9744	1,3439	77
14	0,2443	0,2419	0,2493	4,011	0,9703	1,3265	76
15	0,2618	0,2588	0,2679	3,732	0,9659	1,3090	75
16	0,2793	0,2756	0,2867	3,487	0,9613	1,2915	74
17	0,2967	0,2924	0,3057	3,271	0,9563	1,2741	73
18	0,3142	0,3090	0,3249	3,078	0,9511	1,2566	72
19	0,3316	0,3256	0,3443	2,904	0,9455	1,2392	71
20	0,3491	0,3420	0,3640	2,747	0,9397	1,2217	70
21	0,3665	0,3584	0,3839	2,605	0,9336	1,2043	69
22	0,3840	0,3746	0,4040	2,475	0,9272	1,1868	68
23	0,4014	0,3907	0,4245	2,356	0,9205	1,1694	67
24	0,4189	0,4067	0,4452	2,246	0,9135	1,1519	66
25	0,4363	0,4226	0,4663	2,145	0,9063	1,1345	65
26	0,4538	0,4384	0,4877	2,050	0,8988	1,1170	64
27	0,4712	0,4540	0,5095	1,963	0,8910	1,0996	63
28	0,4887	0,4695	0,5317	1,881	0,8829	1,0821	62
29	0,5061	0,4848	0,5543	1,804	0,8746	1,0647	61
30	0,5236	0,5000	0,5774	1,732	0,8660	1,0472	60
31	0,5411	0,5150	0,6009	1,664	0,8572	1,0297	59
32	0,5585	0,5299	0,6249	1,600	0,8480	1,0123	58
33	0,5760	0,5446	0,6494	1.540	0,8387	0,9948	57
34	0,5934	0,5592	0,6745	1,483	0,8290	0,9774	56
35	0,6109	0,5736	0,7002	1,428	0,8192	0,9599	55
36	0,6283	0,5878	0,7265	1,376	0,8090	0,9425	54
37	0,6458	0,6018	0,7536	1,327	0,7986	0,9250	53
38	0,6632	0,6157	0,7813	1,280	0,7880	0,9076	52
39	0,6807	0,6293	0,8098	1,235	0,7771	0,8901	51
40	0,6981	0,6428	0,8391	1,192	0,7660	0,8727	50
41	0,7156	0,6561	0,8693	1,150	0,7547	0,8552	49
42	0,7330	0,6691	0,9004	1,111	0,7431	0,8378	48
43	0,7505	0,6820	0,9325	1,072	0,7314	0,8203	47
44	0,7679	0,6947	0,9657	1,036	0,7193	0,8029	46
45	0,7854	0,7071	1,0000	1,000	0,7071	0,7854	45
		cos		tg	sin	radians	degrés
						angles	

Remarque : Cas des petits angles. — L'examen de la table précédente permet de constater que pour des angles *petits* (quelques degrés) la valeur numérique de l'*angle* exprimé en radians et celles de son *sinus* et de sa *tangente* sont très voisines.

Pour de faibles valeurs de α *on peut écrire :*

$$\sin\alpha \simeq \alpha_{radians} \simeq tg\alpha.$$

avec une approximation d'autant meilleure que α *est plus petit.*

7. RELATIONS TRIGONOMÉTRIQUES DANS LE TRIANGLE RECTANGLE. — Rappelons ces relations (fig. 3) :

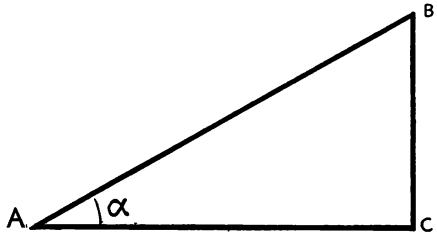


Fig. 3.

$$\overline{AC} = \overline{AB}.\cos\alpha$$
$$\overline{BC} = \overline{AB}.\sin\alpha$$
$$\overline{BC} = \overline{AC}.tg\alpha.$$

Dans un triangle rectangle, un côté de l'angle droit est égal :

a) ***à l'hypoténuse multipliée par le sinus de l'angle opposé (au côté que l'on calcule);***

b) ***à l'hypoténuse multipliée par le cosinus de l'angle adjacent (au côté que l'on calcule);***

c) ***à l'autre côté de l'angle droit multiplié par la tangente de l'angle opposé (au côté que l'on calcule).***

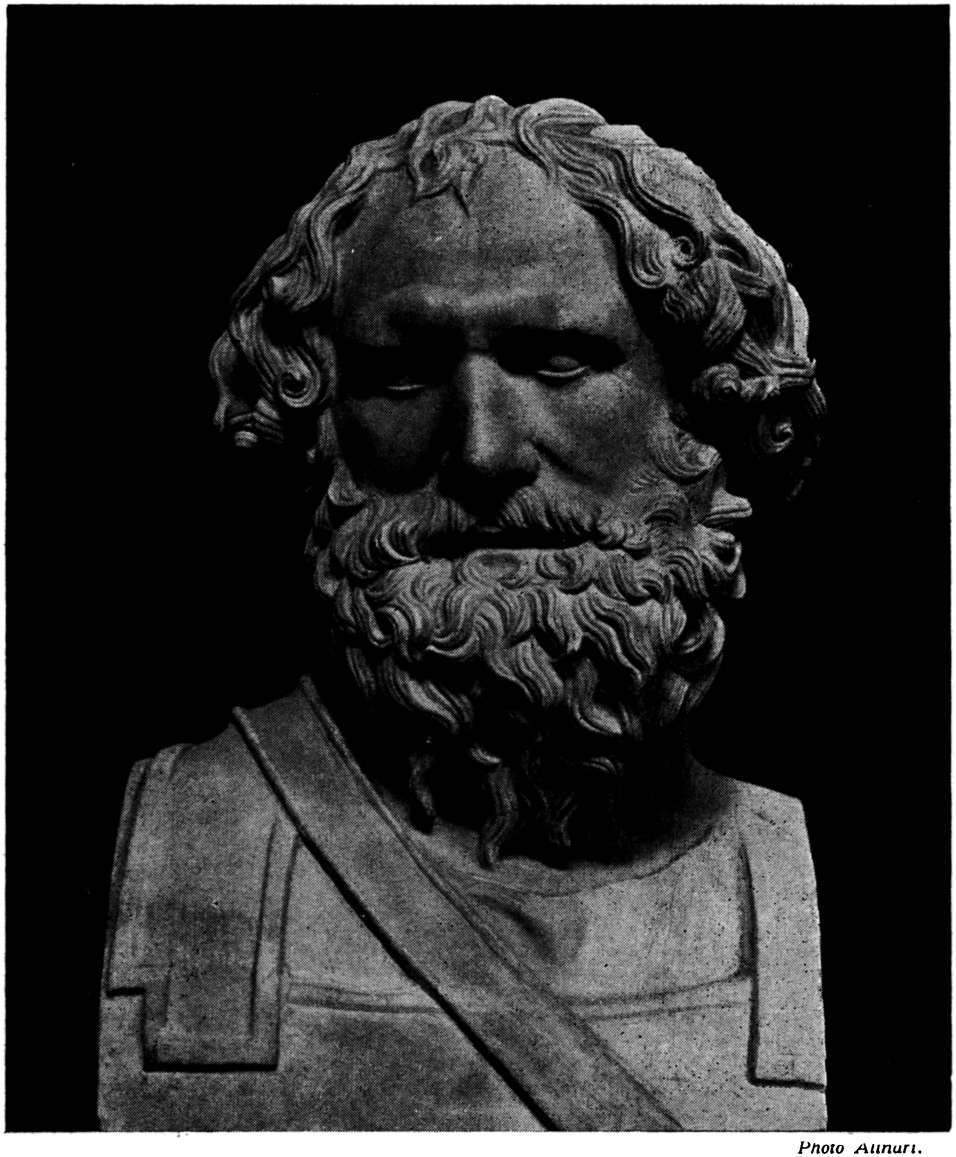


Photo Alinari.

ARCHIMÈDE (287-212 av. J. C.)

Archimède, *géomètre et mecanicien, est le fondateur de la* ***Statique*** *ou Science des équilibres.*

FORCES.
TRAVAIL ET PUISSANCE.
PESANTEUR.

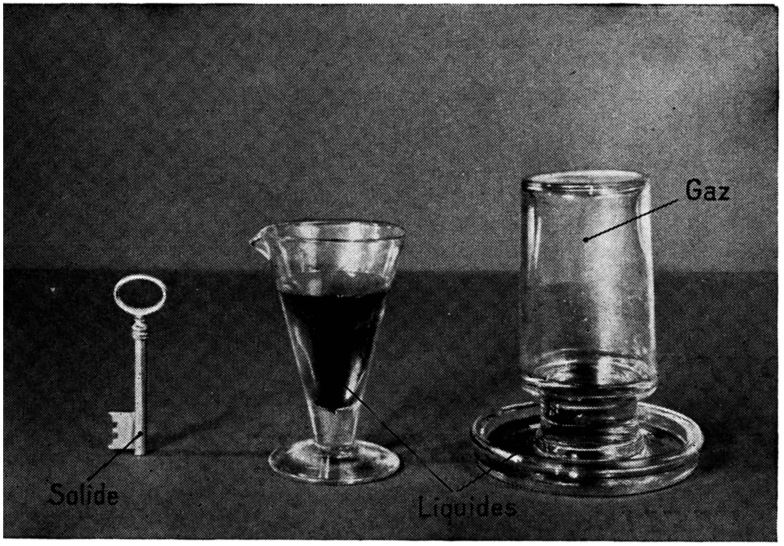


Photo Hatier.

FIG. 1. — *Les* solides *ont une* **forme propre.** *Les* **liquides** *et les* **gaz** *prennent la forme des récipients qui les contiennent; ils sont facilement déformables; ce sont des* fluides.

1. DIFFÉRENTS ÉTATS DE LA MATIÈRE

1. — Nous sommes environnés des corps les plus divers : l'air dont nous sentons la présence autour de nous, l'eau de pluie ou des lacs, le bois des forêts. Tous ces matériaux sont *palpables*; ils constituent ce qu'on appelle : **la matière.** En apparence fort différents, de couleurs et de formes particulières, ils ont cependant une propriété commune : ils peuvent être *pesés.*

Sous leur aspect immédiat, ils présentent des *différences très sensibles* : le fer peut être saisi à la main, l'eau fuit quand on veut la toucher, l'air est même invisible. A ce point de vue, on a coutume de classer les corps en trois catégories :

Les solides : le bois, le plomb, le verre, etc.
Les liquides : l'eau, l'alcool, le mercure, etc.
Les gaz : l'air, le gaz carbonique, etc.

On dit que la matière se présente sous trois états physiques : état **solide,** état **liquide,** état **gazeux.**

Voyons sur quels caractères est basée cette distinction.

2. ÉTAT SOLIDE. — Prenons une barre de fer ou d'acier. Elle est **dure, rigide,** et, quelle que soit sa position, elle se présente avec la même forme si aucun effort n'agit sur elle. Les solides ont une ***forme propre.***

Serrons une de ses extrémités dans un étau (fig. 2) et suspendons une charge à l'autre extrémité : la barre, d'abord horizontale, s'incurve légèrement. Si nous supprimons l'effort, elle revient à sa position primitive pourvu que la charge appliquée ne soit pas trop élevée : elle est **élastique.** Tous les solides possèdent cette propriété à

des degrés divers; l'acier, le duralumin, le bois sont très élastiques; le plomb, l'aluminium le sont très peu.

Comprimons fortement un bloc d'acier; sa forme n'est pratiquement pas modifiée, son volume pas davantage. Un morceau de plomb soumis à une action analogue se déforme notablement, mais son volume reste invariable. Les solides sont **incompressibles.**

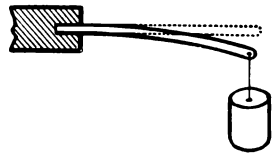


FIG. 2. — *Les solides sont élastiques.*

3. ÉTAT LIQUIDE. — Transvasons une même quantité d'eau d'une carafe dans un verre, puis dans une éprouvette (fig. 3). Sa forme est modifiée à chaque opération et nous notons deux caractères :

L'eau est très facilement **déformable :** elle n'a pas de rigidité, elle coule; elle prend même spontanément la forme du récipent qui la reçoit : les liquides sont des ***fluides.***

Il est toujours possible d'observer un passage brusque entre l'air qui surmonte le verre et l'eau qui en occupe le fond; la surface de séparation est nettement visible : les liquides n'ont ***pas de forme propre,*** mais présentent toujours une ***surface libre*** au contact des gaz.

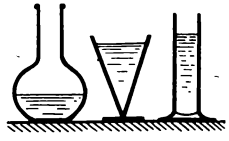


FIG. 3.

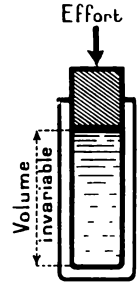


FIG. 4.

Enfermons un liquide dans un récipient indéformable (fig. 4) et exerçons sur lui, par l'intermédiaire d'un piston, un effort considérable. Nous ne parvenons pas à modifier sensiblement son volume : les liquides sont pratiquement ***incompressibles.***

4. ÉTAT GAZEUX. — Les propriétés des gaz sont plus difficiles à observer que celles des liquides et des solides, car les gaz usuels (air, oxygène, vapeur d'eau, etc.) sont pour la plupart *incolores.* On peut cependant mettre en évidence leurs caractères essentiels.

Enfonçons verticalement un flacon dans l'eau, le goulot tourné vers le bas (fig. 5 *a*); l'eau n'emplit pas le flacon; l'air l'empêche de monter. Approchons le goulot de l'orifice d'une longue éprouvette pleine d'eau et incli-

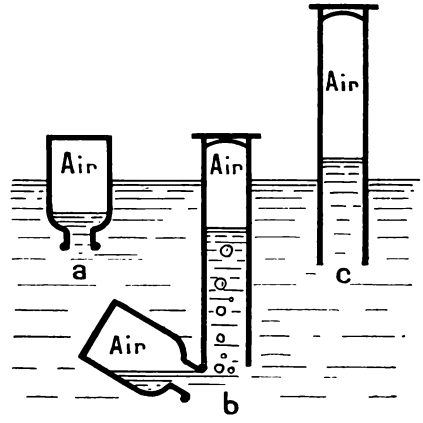


FIG. 5. — *L'air occupe tout le volume qui lui est offert.*

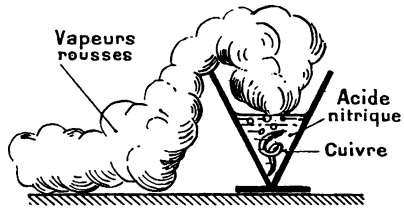


FIG. 6.

nons le flacon (fig. 5, *b*); de grosses bulles d'air s'en échappent et se réfugient dans le fond de l'éprouvette. Par ce simple transvasement, l'air a donc changé de forme.

Enfonçons ou soulevons l'éprouvette (fig. 5, *c*). L'air change très facilement de volume.

Comme l'air, les gaz ***acceptent toutes les formes et tous les volumes.***

Le moindre effort exercé sur eux provoque une très importante diminution de volume : ils sont ***très compressibles.*** Ils se répandent spontanément dans tout le volume qui leur est offert : ils sont ***très expansibles.***

Versons sur un morceau de cuivre un peu d'acide nitrique (fig. 6). Un gaz coloré en roux, se dégage, emplit le verre, déborde, se répand au-dessus de la table :

Un gaz coule; comme un liquide c'est un **fluide.**

Quand l'attaque du cuivre est terminée, les vapeurs rousses persistent quelque temps dans le verre, mais il est impossible d'observer une surface de séparation nette entre le gaz coloré et l'air ambiant : les gaz n'ont ***pas de surface libre*** au contact d'autres gaz.

Comprimons de l'air dans une pompe à bicyclette. Quand nous lâchons la poignée, elle est vivement ramenée à sa position initiale : comme l'air, les gaz sont ***élastiques.***

Enfin, les gaz sont **pesants.** Bien que, pour un volume donné, leur poids soit en général faible, on peut le mettre en évidence avec la balance : voici le poids approché d'un mètre cube pour quelques gaz pris à la température ordinaire d'un laboratoire :

Air (puisé dans l'atmosphère) : poids de 1 m³. . .	environ	1,3	kgf [1]
Gaz d'éclairage (recueilli au robinet d'arrivée). . .	—	0,5	—
Gaz carbonique (recueilli sur la cuve à eau)	—	2	
Hydrogène (recueilli sur la cuve à eau)	—	0,09	—

5. CHANGEMENT D'ÉTAT D'UN CORPS. — Par une journée très froide, observons à l'extérieur un morceau de glace. Il présente les caractères particuliers des *solides* : la glace est de l'eau solide. Portons-le dans une pièce chauffée. Il fond et donne de l'eau *liquide.* Recueillons cette eau et portons-la à l'ébullition, elle se transforme en *vapeur* d'eau, invisible, qui se répand dans la pièce.

Le fait est général :

Un même corps peut se présenter (*suivant les conditions*) *sous l'un des trois états :* **solide, liquide, gazeux.**

6. LA CONSTITUTION DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ. — De nos jours, les savants sont parvenus à confirmer par des recherches expérimentales une idée émise il y a de nombreux siècles sur la constitution de la Matière.

(1) L'abréviation ***kgf*** désigne le mot : ***kilogramme-force*** Cette unité de poids doit, pour l'instant, être considérée comme le poids d'une quantité de matière nommée par un épicier « *un kilo* ».

LES ATOMES. — Les solides, liquides, gaz que nous voyons autour de nous sont constitués par de très petits *grains indivisibles de matière*, appelés ***atomes.***

Bien que les corps de la nature soient innombrables et très variés (eau, air, bois, sucre, fer, aspirine, marbre, etc.) ils ne contiennent qu'un nombre relativement restreint d'espèces d'atomes. C'est que, pour former toutes les matières, les atomes s'assemblent un peu comme le font les lettres de l'alphabet qui, cependant peu nombreuses, forment d'innombrables mots, les mots donnant ensuite des phrases.

LES PARTICULES DE MATIÈRE; LEUR AGITATION. — Très souvent les atomes sont groupés en assemblages tous identiques, par exemple *deux* atomes ***A*** avec *un* atome ***B*** ou *deux* atomes ***A*** ensemble. Ils constituent ainsi des « paquets d'atomes » dont chacun présente une individualité très marquée. De tels paquets sont nommés ***molécules.*** Ainsi on peut identifier des molécules d'eau, de benzine, d'alcool, de soufre, d'oxygène.... Parfois aussi les atomes ne se groupent pas : exemples du gaz appelé *néon* qui garnit les tubes de certaines enseignes lumineuses, du *cuivre* à l'état gazeux. Dans ces cas particuliers l'atome et la molécule se confondent; la molécule n'est plus *polyatomique* comme dans les exemples précédents, mais *monoatomique.*

Parfois encore, comme dans un morceau de *fer* solide, ou un cristal de *sel de cuisine*, ou dans la plupart des *matières plastiques*, l'arrangement des atomes est tel qu'on ne peut plus y distinguer des groupements méritant le nom de molécules.

Au cours des leçons de ce livre c'est surtout sous la forme moléculaire que nous rencontrerons les matériaux qui serviront à nos expériences. Mais de toutes façons, pour mieux comprendre les propriétés des liquides, des solides et des gaz, nous devrons peu à peu nous habituer à les considérer comme formés par des fragments individuels, séparés, plus ou moins voisins, ou ***particules de matière.***

Le *Cours de Chimie* de la *Classe de Seconde* apportera quelques notions sur les molécules et les assemblages d'atomes. Contentons-nous de citer ici des propriétés importantes qui nous seront utiles :

a) **Les particules matérielles sont très petites et très nombreuses :** Un gramme d'eau contient environ 30 000 milliards de milliards de molécules d'eau. Cela nous montre leur extraordinaire petitesse et nous donne une idée du nombre extraordinaire de particules que doit comprendre le plus petit des objets que nous touchons, ou que nous pouvons voir même avec le plus puissant microscope.

b) **Les particules matérielles sont en perpétuelle agitation :** Elles sont animées de mouvements *désordonnés*, en tous sens, effectués généralement à de *grandes vitesses.* Cette agitation dépend d'ailleurs de la *température.* Quand nous disons que la « température » de l'eau s'élève, cela correspond à une augmentation des vitesses moléculaires.

Quelle image devons-nous donc nous faire de chacun des trois états physiques, assez distincts : *solide, liquide, gazeux?*

1. Dans les solides, les granules de matière sont disposés assez régulièrement, un peu à la manière des briques d'un mur. Ils occupent des places à peu près fixes et n'effectuent, autour de leur position moyenne, que des mouvements très rapides et d'amplitude très réduite. On conçoit qu'ainsi rassemblés et serrés les uns contre les autres en *édifice compact* ils donnent au corps qu'ils constituent la *forme propre* et la *rigidité* caractéristiques. La figure 7[1] montre,

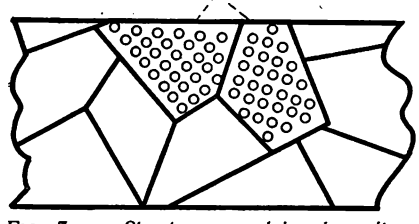


FIG. 7. — *Structure granulaire des métaux et des alliages.*

(1) Aucune échelle ne pouvant être adoptée pour représenter en même temps les grains de matière, leurs assemblages et les récipients qui les contiennent, les figures 7, 8 et 9 ne peuvent donner aucune idée exacte des dimensions *relatives* réelles.

schématiquement, la constitution d'un morceau de fer : c'est une agglomération de petits fragments imbriqués les uns dans les autres, chacun étant formé par un arrangement régulier d'atomes de fer.

2. Dans les liquides, les molécules, beaucoup moins serrées que dans les solides, ont la faculté de se déplacer les unes par rapport aux autres. On peut les comparer à un amas de billes extrêmement nombreuses et parfaitement polies, capables de rouler les unes sur les autres. Versées en tas sur une table, ces billes se répandraient en donnant l'aspect habituel d'un liquide qui coule. Placées dans un vase de forme quelconque, ces innombrables billes parfaitement mobiles, roulant, glissant, se bousculant éternellement épouseraient les formes des parois les plus compliquées, s'infiltrant dans tous les coins, conservant pratiquement toujours *le même volume* (*assemblage condensé*) et présentant une *surface libre.*

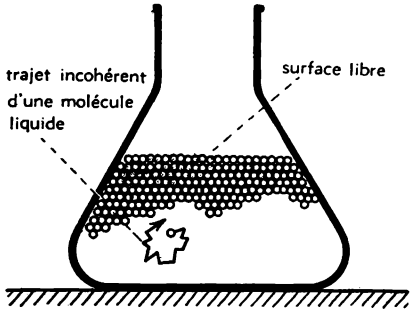


FIG. 8. — *Image de l'entassement des molécules dans un liquide : état* ***condensé.***

La figure 8 est l'image de l'eau dans un vase. La séparation entre l'eau et l'air est en réalité une sorte de tapis ou pavage mouvant où fourmillent en tous sens des molécules d'eau; mais ces molécules sont si petites et si nombreuses que nos yeux voient seulement une surface unie et plane.

3. Dans les gaz, les molécules sont encore beaucoup plus libres. Séparées les unes des autres par des *vides énormes* (par rapport à leurs dimensions propres), entraînées dans des mouvements incessants effectués à des vitesses considérables, renvoyées comme des balles dans des directions absolument incohérentes, au hasard de millions et de millions de chocs, les molécules gazeuses enfermées dans un ballon clos évoquent l'image d'une nuée de moucherons sans intelligence, virevoltant sans arrêt dans un bocal bouché, en occupant toujours tout l'espace qui leur est offert. Si le bouchon s'ouvre, ils s'échappent, au hasard de leur passage devant l'ouverture, et l'essaim peu à peu finit par s'évanouir; il en est de même des molécules gazeuses qui *diffusent lentement* dans l'atmosphère. Si on réduit le volume de leur prison, ils ne cessent pas leurs mouvements, mais les effectuent en restant plus proches les uns des autres. De même, les molécules gazeuses se rassemblent dans un *espace plus restreint* : les gaz sont *compressibles.*

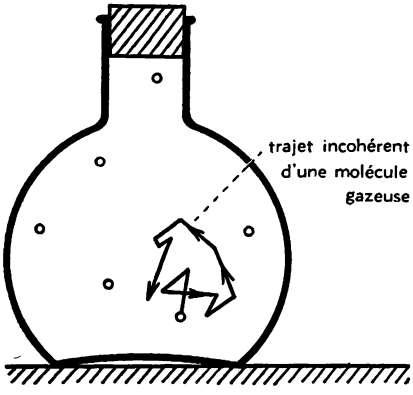
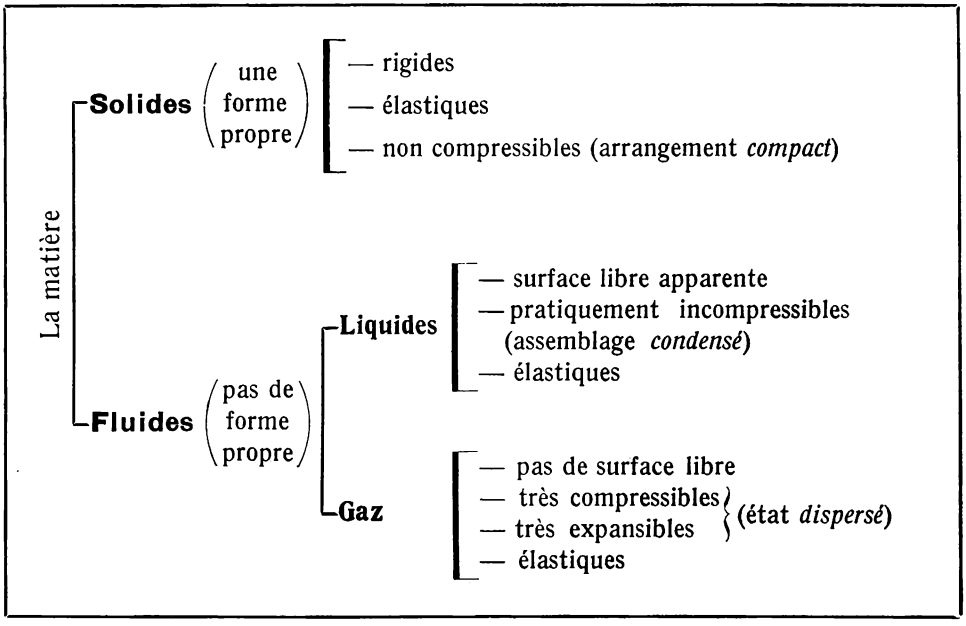


FIG. 9. — ***Dans un gaz les molécules sont dans un état très dispersé.***

La figure 9 ne peut donner qu'une représentation incomplète de l'*état parfaitement dispersé* de la matière sous forme gazeuse.

Classons, pour résumer, les caractères distinctifs des solides, des liquides et des gaz :



Remarque. — A la réflexion, cette classification paraît quelque peu artificielle; dans quelle catégorie devrons-nous ranger : le miel, le beurre, le caoutchouc?... En réalité, elle est *commode* et suffisamment explicite pour les besoins de la Physique. Quand nous dirons « un solide », nous penserons à un morceau de fer et non pas à un corps mou et essentiellement déformable comme une éponge....

7. ÉTAT DE REPOS. ÉTAT DE MOUVEMENT. — Nous disons qu'un solide, un liquide, ou un gaz est en état de *repos* (en *équilibre*) quand aucune de ses parties constitutives ne change de position. Exemple : une assiette sur une table, de l'eau immobile dans une carafe, l'air parfaitement calme. D'après ce qui précède, nous comprenons qu'il ne s'agit là que d'un *repos apparent.*

Mais à l'échelle ordinaire de nos observations, nous ne pouvons absolument pas nous rendre compte de l'agitation intérieure des particules élémentaires constituant les corps qui nous entourent.

C'est pourquoi nous appellerons ***équilibre*** ou ***repos*** l'état de la matière dans lequel toutes les particules sont animées de leur agitation permanente et désordonnée. S'il advient que, tout en conservant leurs mouvements incohérents, elles se trouvent toutes entraînées *en même temps du même côté,* nous dirons que nous avons atteint l'***état de mouvement*** : c'est le cas d'un gaz comprimé qui s'échappe d'un récipient par une ouverture, d'une pierre qui tombe, d'un liquide qui coule.

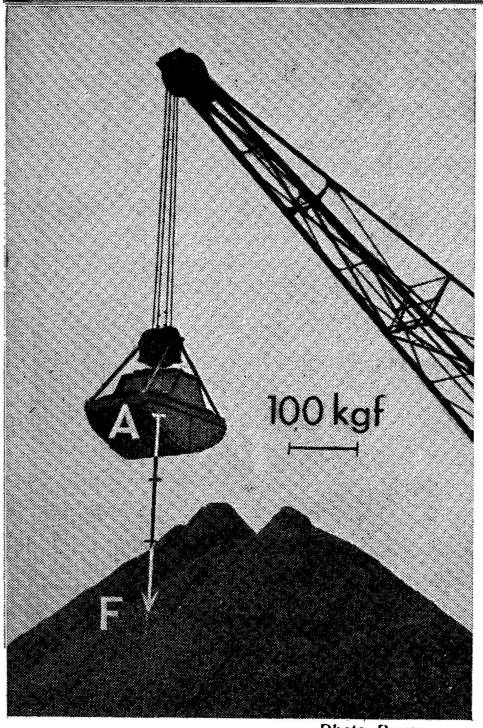


Photo Boyer.

FIG. 1. — *Tout corps est soumis à une force attractive de la Terre : son* ***poids.*** *Le* **vecteur** $\overrightarrow{AF}$ *représente une telle force, d'intensité égale à* 300 *kilogrammes-force.*

2. FORCES

A. NOTION DE FORCE. DÉFINITION. UNITÉS

1. — Pour maintenir au dessus du sol un objet pesant (caillou, pomme, couteau...) nous devons exercer un effort. De là nous vient la notion de ***force.*** Nous disons qu'il faut exercer une *force* pour maintenir un corps en place, et que la Terre exerce une *force attractive* qui tend à le faire tomber.

Un clou qui tombe est dévié de sa trajectoire s'il passe au voisinage d'un aimant; un aimant, approché assez près, peut lui faire quitter l'état de repos; il exerce une *force magnétique.*

Nos mains doivent également développer une force pour écraser une motte de terre, allonger une lanière de caoutchouc, courber une lame d'acier.

Ces exemples, où l'on voit intervenir des corps immobiles et des corps en mouvement, conduisent à deux définitions.

Définition statique (1) **:** ***Une force est une cause capable de maintenir un corps au repos ou de le déformer.***

Définition dynamique (2). ***Une force est une cause capable de provoquer ou de modifier le mouvement d'un corps.***

Dans la *Classe de Seconde* seule la première définition sera utilisée, car les raisonnements et la plupart des expériences n'intéresseront que des objets *au repos.*

Ainsi *la grandeur appelée force se reconnaît seulement à ses effets :* changements dans

(1) Statique : du latin : *stare,* demeurer, rester.
(2) Dynamique : du grec : *dunamis,* force.

les mouvements ou dans les formes des corps auxquels on dit qu'elle est appliquée : des forces peuvent être comparées entre elles par leurs effets et, parmi ces derniers, nous choisirons, plus loin, les *déformations subies par les corps élastiques.*

2. MESURE D'UNE FORCE (fig. 2 et 3). — Soit une lame d'acier horizontale encastrée à l'une de ses extrémités et portant à l'extrémité libre un *index* qui peut se déplacer devant une règle verticale. Un crochet permet de suspendre différents objets à la lame ce qui provoque des déformations.

FORCES ÉGALES

Définition : *La Terre exerce sur deux corps* ***A*** *et* ***B*** *deux* ***forces égales*** $\boldsymbol{F}_A$ *et* $\boldsymbol{F}_B$ *(deux poids égaux) si les corps* ***A*** *et* ***B*** *suspendus séparément au même point de la lame élastique provoquent la même déformation.*

On écrit : $\boldsymbol{F}_A = \boldsymbol{F}_B = \boldsymbol{F}$ *(valeur commune).*

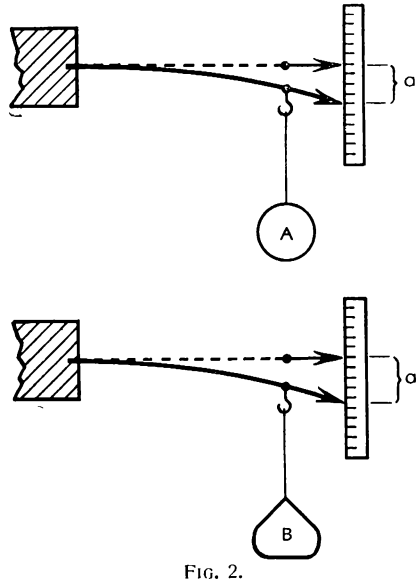


FIG. 2.

SOMME DE PLUSIEURS FORCES

Définition : *La Terre exerce sur un corps* ***C*** *une force (un poids)* $\boldsymbol{F}_C$ *égale à la* ***somme des forces*** *(poids) qu'elle exerce sur deux corps* ***A*** *et* ***B*** *si le corps* ***C*** *suspendu au même point de la lame élastique provoque seul la même déformation que les corps* ***A*** *et* ***B*** *réunis.*

On écrit : $\boldsymbol{F}_C = \boldsymbol{F}_A + \boldsymbol{F}_1$.

Si $F_A = F_1$: $\boldsymbol{F}_C = \boldsymbol{2F}$.

GÉNÉRALISATION : MESURE D'UNE FORCE. — D'après ce qui précède, on comprend comment peut être défini un poids double, triple, quadruple .... d'un autre.

Nous pouvons admettre que ce qui est possible pour les poids (forces particulières) l'est aussi pour les autres types de forces.

Or, mesurer une grandeur G, c'est, par une opération conventionnelle, trouver *combien de fois cette grandeur* ***G*** *contient une autre grandeur de même espèce* ***g***, choisie comme unité. Une force est donc une grandeur *mesurable.*

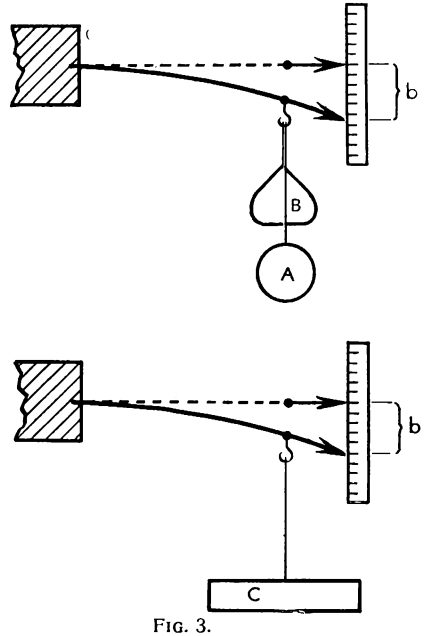


FIG. 3.

3. UNITÉS DE FORCE. — Indispensable pour mesurer des forces et préciser leurs valeurs par des nombres, une unité de force doit être fixée avec rigueur et absolument invariable. On peut choisir la force exercée par la Terre sur un certain corps, placé en un certain lieu. Cette force qui comporte des garanties complètes d'invariabilité est un ***étalon de force.***

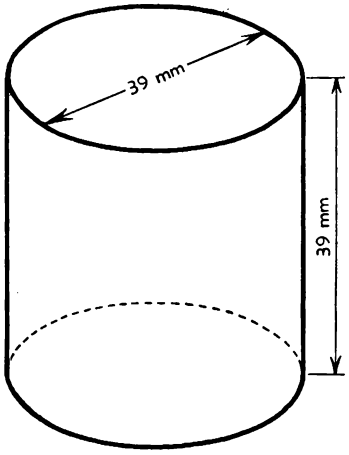


FIG. 4. — *Le cylindre etalon (grandeur naturelle).*

L'OBJET : LE CYLINDRE INTERNATIONAL. — Le *Bureau International des Poids et Mesures* (*B. I. P. M.*) conserve au *Pavillon de Breteuil*, à Sèvres (Seine-et-Oise) un cylindre plein, en platine iridié (alliage de platine à 10% d'iridium) dont la figure 4 donne les dimensions approximatives. Cet objet, pratiquement inaltérable, sera appelé dans la suite *cylindre international.* Des copies, aussi parfaites que possible, ont été exécutées et confiées aux différents pays qui ont adopté le Système Métrique.

L'ÉTALON : LE KILOGRAMME-FORCE (***kgf***).

Définition : *Le kilogramme-force est la force exercée par la terre sur le cylindre international.*

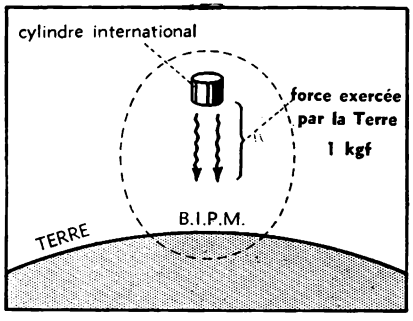


FIG. 5. — *Attraction de la Terre sur le cylindre international : 1 kgf.*

Une force égale à 138 fois un kilogramme-force s'écrit(1) :

$$F = 138 \ kgf.$$

On utilise les multiples et sous-multiples du kilogramme-force, en particulier le *gramme-force* ***(gf)*** qui est égal à un millième de kilogramme-force.

On vend dans le commerce des collections d'objets en laiton, acier, fonte .... appelées « poids marqués ». Ces séries sont construites de telle sorte que la Terre exerce sur leurs objets des poids multiples ou sous-multiples de celui qu'elle exercerait sur le cylindre étalon placé au même lieu. Nous reviendrons plus tard sur la composition de ces « boîtes de poids ». Notons seulement ici que le nombre 200 gravé ou imprimé sur un de ces objets signifie que *s'il était placé au Pavillon de Breteuil il subirait de la part de la Terre une force de* 200 *gf.* Pratiquement, employé en un lieu quelconque du globe, le même objet possède un

(1) En Physique les abréviations des unités de mesures ne prennent pas d'*S* au pluriel.

poids très voisin de 200 gf. Une boîte de « poids marqués » représente donc une collection de forces étalonnées qui peut servir à mesurer, par comparaison, et entre certaines limites, des forces quelconques.

Remarque. — Bien que les poids des corps soient, au point de vue pratique, des forces d'un très grand intérêt, il ne faut pas oublier que ce sont seulement des *forces particulières* qu'il est commode de prendre comme exemple.

Or, dans la vie courante on relève souvent une certaine confusion dans l'emploi des unités.

On donne au kilogramme-force, que nous avons défini, un autre nom : le *kilogramme-poids* (*kgp*). Le kilogramme-force et le kilogramme-poids désignent *la même unité*. On se contente parfois de dire « *kilogramme* » (*kg*) ou même : « *kilo* », et d'écrire, par exemple :

... **cette automobile pèse 1 200 kilogrammes.**

... **son poids est : P = 1 200 kg.**

Pour des raisons qui seront mieux comprises plus loin nous éviterons cette écriture *incorrecte*, en nous conformant strictement aux définitions, au vocabulaire, aux abréviations acquis jusqu'ici. Surtout nous nous efforcerons de ne jamais confondre ni dans l'esprit, ni dans le langage, l'*objet* (le cylindre international) et la *force* exercée par la Terre sur cet objet (le kilogramme-force).

LE NEWTON (N) (1). — C'est une unité nouvelle dont l'emploi a été proposé il y a quelques années pour harmoniser les unités de mesure dans les domaines de la Mécanique et de l'Electricité. — L'emploi du *newton*, bien adapté aux usages scientifiques, remplacera un jour celui du kilogramme-force dans l'Industrie. On retiendra la correspondance suivante (2) :

$$1\ N \simeq \frac{1}{9{,}81}\ kgf.$$

Le newton est donc une force environ 10 fois plus faible que le kilogramme-force. Dans les calculs on peut prendre :

$$1\ N \simeq 0{,}102\ kgf = 102\ gf.$$

LA DYNE. — Quand les Physiciens ont à exprimer des forces très petites ils emploient souvent la ***dyne*** (pas d'abréviation). La dyne est la cent-millième partie du newton. On peut donc écrire :

$$1\ N = 10^5\ dynes.$$

En résumé :

$$1\ kgf \simeq 9{,}81\ N \simeq 981\,000\ dynes.$$

---

(1) Le nom de cette unité est celui d'un illustre savant anglais NEWTON (v. notice biographique). On notera que le symbole *N* est une lettre *majuscule*. C'est la règle admise aujourd'hui pour former une abréviation quand le nom d'une unité de mesure est formé à partir d'un nom propre.

(2) Les raisons du facteur numérique *9,81* seront expliquées dans le *Cours de Physique de la Classe de Mathématiques Elémentaires*. Elles se rattachent à la définition dynamique de la force.

B. MESURE PRATIQUE DES FORCES

4. ÉTALONNAGE D'UN RESSORT.

1. REPÉRAGE DES FORCES ET DES ALLONGEMENTS. — Prenons un ressort à boudin à spires *non jointives*; adaptons à son extrémité une tige *t* portant un *index i* et un plateau *p* (fig. 6).

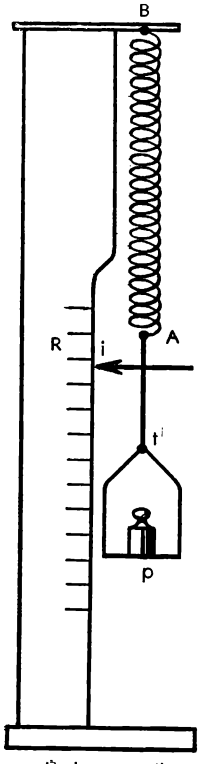


FIG 6. — *Etalonnage d'un ressort.*

Sous des forces croissantes, le ressort, dont un point B est fixe, prend des allongements croissants, que nous pouvons mesurer par le déplacement de l'index *i* le long d'une règle graduée verticale R.

A l'aide de forces connues (forces attractives de la Terre sur les « poids marqués » en laiton), exerçons des tractions de plus en plus grandes, notons l'allongement correspondant à chacune des forces et consignons les résultats dans un tableau.

EXPÉRIENCE N°	FORCES (gf)	ALLONGEMENTS (mm)
1	20	8
2	40	15
3	60	25
4	80	30
5	100	39
6	120	46
7	140	55
8	200	80
9	250	100
10	300	115

Ce tableau d'étalonnage nous permet maintenant une mesure grossière des forces de 0 gf à 300 gf.

Soit à mesurer la force **f** exercée par notre main sur le ressort quand il s'allonge de 43 mm. Nous voyons, d'après le tableau, que la force **f** s'intercale entre 100 gf et 120 gf, et qu'elle est plus voisine de 120 gf que de 100 gf.

Nous ne pouvons mesurer avec exactitude qu'une force à laquelle correspond un allongement inscrit dans le tableau.

2. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE : LOI. — Soient deux axes de coordonnées rectangulaires (fig. 7). Portons en ordonnées les *allongements* et en abscisses les *forces* qui les provoquent, après avoir choisi une échelle convenable sur les deux axes.

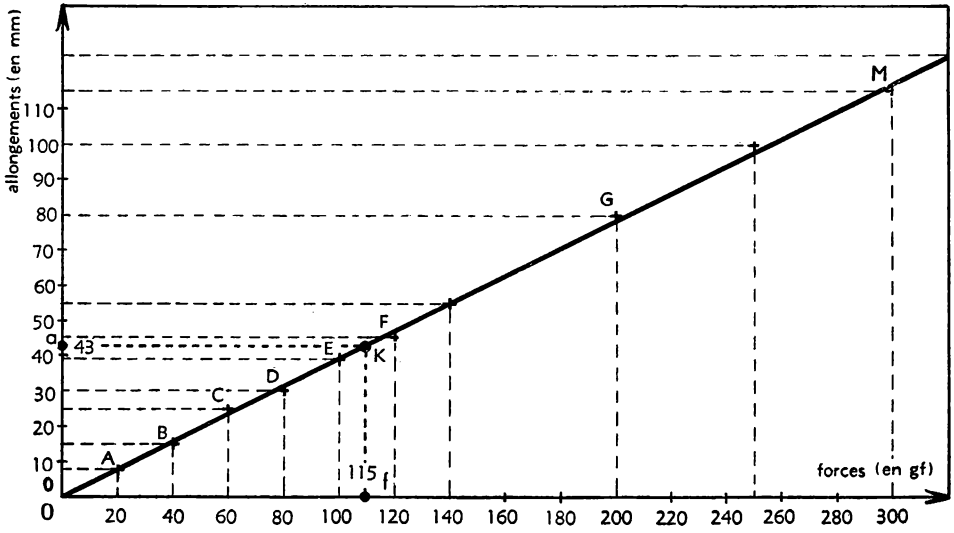


FIG. 7. — *Courbe d'étalonnage d'un ressort à spires non jointives.*

A chaque couple de nombres inscrits dans une ligne du tableau correspond un point du plan. Ainsi l'expérience n° 4 fournit le point D (abscisse : 80 gf, ordonnée : 30 mm).

Nous obtenons ainsi une série de points ABCDEF... dont chacun est la traduction graphique d'une expérience d'allongement sous l'effet d'une force donnée.

Faisons passer une courbe ***régulière*** *le plus près possible du plus grand nombre de points possible.* Pour cela nous nous laisserons guider par la disposition générale de l'ensemble.

Nous remarquons ici que ces points sont sensiblement *alignés* sur une droite passant par l'origine des axes. Un point tel que G s'éloigne manifestement de cette droite. Nous attribuerons cette anomalie à une erreur dans la mesure de l'allongement relatif à l'expérience n° 8. Si l'écart est trop grand, nous devrons recommencer cette mesure.

Nous avons ainsi résumé de façon suggestive une série d'expériences par un graphique. Ce graphique nous conduit immédiatement à la ***loi*** du phénomène étudié.

Loi : *Les allongements d'un ressort à spires non jointives sont proportionnels aux forces qui les produisent.*

3. UTILISATION DU GRAPHIQUE. — Revenons à la force **f** à laquelle correspond l'allongement 43 mm. Marquons le point correspondant *a* sur l'axe des allongements. Le point K de la droite qui a O*a* comme ordonnée

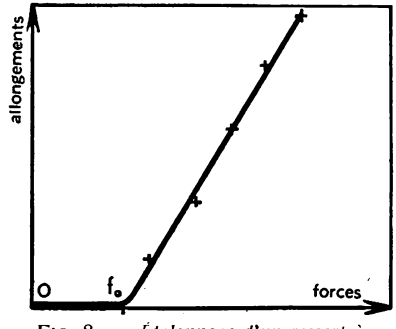


FIG. 8. — *Étalonnage d'un ressort à spires jointes.*

admet O*f* comme abscisse. Sur l'axe correspondant nous lisons la valeur exacte de la force : **f** = 115 gf.

Ainsi un ressort muni de son graphique d'étalonnage peut servir à mesurer des forces. Un tel appareil est appelé : ***dynamomètre.***

4. CAS D'UN RESSORT A SPIRES JOINTIVES. — Si on étudie la déformation d'un ressort dont les spires sont initialement serrées les unes contre les autres, on observe qu'aucun allongement visible ne se manifeste tant que la force n'a pas atteint une certaine valeur f_0 qui dépend du ressort essayé. Ensuite les *accroissements* de l'allongement sont proportionnels aux *accroissements* de la force. La courbe d'étalonnage présente donc la forme indiquée par la figure 8. L'appareil ne peut servir de dynamomètre que pour des forces *supérieures à* f_0.

Remarque. — *Tracé et utilisation des graphiques.* — Les graphiques sont très souvent utilisés en Physique. Sous une forme simple, ils résument en général une longue série d'expériences et *suggèrent les lois* qui régissent les phénomènes étudiés. Cependant leur utilisation comporte une part d'incertitude.

a) La position de chacun des points est le résultat de mesures. Chaque point n'est donc déterminé que d'une manière *approchée.*

b) Entre les différents points A, B, C..., la courbe traduit des expériences qui n'ont pas été faites. Dans le tracé, on suppose que le phénomène obéit à la même loi aux points ABC... et dans les intervalles. Aussi le point K, et la force **f** qui lui correspond ont été obtenus par une simple opération de dessin. C'est ce qu'on appelle faire une ***interpolation.***

c) En dehors du domaine expérimental étudié (par exemple, pour des allongements supérieurs à 115 mm), on peut encore avoir une idée de la manière dont se passeraient probablement les faits. Il suffit de prolonger la courbe au-delà du point M en se laissant guider par le tracé antérieur. Cette opération, plus hasardeuse que la précédente, porte le nom d'***extrapolation.***

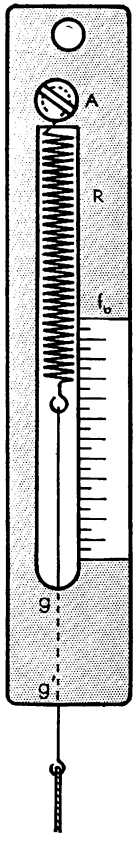


FIG. 9.
Dynamomètre d'étude.

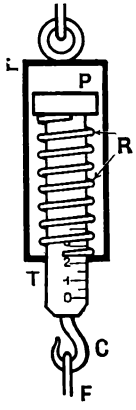


FIG. 10.

5. DYNAMOMÈTRES USUELS. — Pour la plupart ils utilisent la déformation des solides élastiques.

1. DYNAMOMÈTRE D'ÉTUDE (fig. 9). — Un dynamomètre simplifié peut être réalisé par un ressort ***R*** à spires jointives ou non, dont une extrémité ***A*** est fixée à une lame rigide et légère (matière plastique, bois de balsa, aluminium, carton). A l'autre extrémité est attaché un mince fil d'acier qui passe sans frottement appréciable dans un guide ***gg'***. C'est la dernière spire du ressort qui sert d'index en se déplaçant *très près* d'une graduation obtenue par un étalonnage exécuté avec des poids connus.

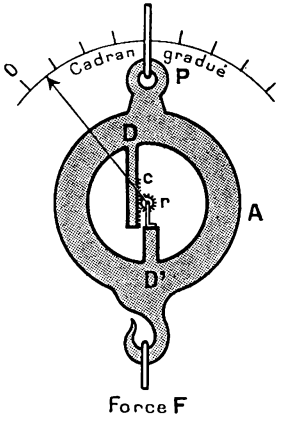


FIG. 11.

Dynamomètre à anneau.

2. PESON A RESSORT (fig. 10). — Dans un cylindre L formant le corps de l'appareil, une tige rigide T, terminée par un crochet C, porte à sa partie supérieure une plaque P qui appuie sur le ressort R. Ce dernier, au lieu de subir un allongement par traction, ses raccourcit par compression suivant une loi identique.

La tige T peut servir elle-même à repérer la déformation du ressort. On peut par un étalonnage convenable la graduer *directement en forces.* Ainsi sur l'appareil de la figure, la force appliquée en C est 2 kgf.

Le peson à ressort permet de mesurer des forces allant jusqu'à quelques kilogrammes-force.

3. DYNAMOMÈTRE A ANNEAU (fig. 11). — Un anneau d'acier très résistant A est intercalé entre le point d'appui fixe P et la force F comme un robuste maillon de chaîne. Sous l'effort, il prend une forme légèrement ovalisée. Deux tiges sont reliées aux extrémités du diamètre DD' de l'anneau; l'une d'elles porte une crémaillère *c* qui s'engrène sur les dents d'une roue dentée *r* portée par l'autre.

Les déformations de l'anneau sont fortement *amplifiées* à l'aide d'une aiguille entraînée par la roue dentée; cette aiguille se déplace devant un cadran gradué lors de l'étalonnage. Cet appareil peut supporter des forces de plusieurs milliers de kilogrammes-force (traction d'une locomotive, d'un remorqueur).

Pour la mesure des forces très petites, on emploie très souvent la **balance** (chapitre 9).

Pour la mesure des forces très grandes, on procède indirectement en mesurant les **pressions** qu'elles fournissent (chapitre 18).

6. QUALITÉS, DÉFAUTS DES DYNAMOMÈTRES. — Les dynamomètres sont des appareils ***robustes et commodes,*** mais présentant quelques défaut importants :

a) Une faible force (quelques grammes-force) ne provoque pas de déformation appréciable; on dit qu'ils sont ***peu sensibles.***

b) Après avoir été déformé, le métal, imparfaitement élastique, ne revient pas rigoureusement à sa position initiale. Le zéro de l'appareil n'est pas fixe, et toutes les indications ultérieures devront subir des corrections souvent difficiles à évaluer; les dynamomètres sont des appareils ***peu fidèles*** (1).

On peut cependant perfectionner leur emploi

Le choix du ressort (qualité de l'acier, dimensions des spires...) permet d'améliorer beaucoup la sensibilité et la fidélité, mais il faut se garder de soumettre le métal à des efforts trop grands. Aussi, quand on doit mesurer des forces d'intensités très différentes, faut-il prévoir plusieurs appareils, chacun étant adapté à une partie de la gamme des forces à connaître. Dans ces conditions on peut effectuer une mesure dont le grand avantage est d'être rapide. Sa précision (2 à 3 % d'erreur) est en général suffisante.

Certains instruments destinés à des usages très spécialisés (recherches de pétrole) utilisent des ressorts dont les indications ne comportent pas d'erreurs relatives (2) supérieures à un cent-millième.

7. NOTE SUR LES APPAREILS DE MESURE. — En étudiant le dynamomètre nous nous trouvons, pour la première fois, en présence d'un appareil spécialement construit pour une mesure. Les instruments de mesures dont on se sert en Physique sont très nombreux et de types très variés. On exige d'eux un certain nombre de qualités, que nous pourrons définir ainsi :

Justesse : *On dit qu'un appareil est* juste *quand, par construction, il répond exactement à sa définition.* — Exemple : un chronomètre est juste si le constructeur a réussi à lui faire indiquer des secondes, des minutes... de durées rigoureusement égales à celles qui sont indiquées par une horloge astronomique, appelée horloge-étalon.

La justesse est une qualité toujours recherchée, mais difficile à atteindre, et pas toujours acquise.

Fidélité : *On dit qu'un appareil est* fidèle *si, employé à la même mesure à plusieurs reprises, il fournit les mêmes indications.* — Une montre (même non juste) dont la marche est parfaitement régulière est un appareil fidèle. Une montre qui avance ou retarde avec une marche capricieuse et imprévisible n'est pas fidèle. De même un dynamomètre dont la lame d'acier ne reprend jamais après usage exactement la longueur initiale n'est pas fidèle.

La fidélité est la **qualité primordiale;** elle indique le degré de confiance qu'on peut avoir dans les indications d'un appareil.

Sensibilité : *On dit qu'un appareil est* sensible *quand une faible variation de la grandeur à mesurer produit un grand déplacement d'un index.*

Pour la mesure d'un temps, une montre qui n'aurait conservé que l'aiguille des heures serait 12 fois moins sensible qu'une montre ordinaire avec son aiguille des minutes et 720 fois moins sensible qu'un chronomètre dont l'aiguille trotteuse accomplit un tour de cadran en une minute.

La sensibilité est une qualité très importante, puisqu'elle permet des mesures précises. Elle est de plus relativement facile à obtenir. Pour améliorer la sensibilité d'un dynamomètre à anneau (fig. 11), il suffit de lui donner une **très longue aiguille,** de sorte que pour une même variation de la force à mesurer le déplacement de la pointe de cette aiguille soit plus grand.

Mais si le manque de fidélité d'un dynadomètre à anneau entraîne dans une mesure une erreur possible de 2 kgf, il serait illusoire de le munir d'un dispositif amplificateur, tel qu'un déplacement de 1 mm de la pointe de l'aiguille traduise par exemple une variation de 10 gf de la force appliquée!...

(1) La loi française interdit l'emploi des *pesons* pour le commerce.
(2) ***erreur relative.*** Les notions sur les *erreurs* sont étudiées en *Travaux pratiques.*

D'une façon générale, ***on n'a pas intérêt à augmenter outre mesure la sensibilité d'un appareil en espérant ainsi effectuer des mesures plus précises. On atteindrait aisément un degré de sensibilité tel que la fidélité ne serait plus assurée.***

C'est donc la *fidélité*, qualité essentielle, qui sert de limite à la recherche de la sensibilité.

Autres qualités :

On apprécie également la *robustesse*, la *commodité* d'emploi et de transport, le *faible encombrement* et le *faible prix* de revient, etc.; mais ce sont là des qualités accessoires, dont le Physicien sait fort bien se passer quand il veut avoir affaire à un appareil sensible et surtout fidèle.

C. REPRÉSENTATION D'UNE FORCE

8. LES QUATRE ÉLÉMENTS. — Exerçons une force sur un solide S (fig. 12) en le tirant par l'intermédiaire d'une ficelle, et essayons de définir complètement et sans ambiguïté les caractères de cette force. Nous obtiendrons ce résultat en indiquant :

a) ***son point d'application.*** — C'est le point sur lequel elle s'exerce : ici le point A.

b) ***sa direction.*** — La droite suivant laquelle elle agit : ici *ff'* ou Δ.

c) ***son sens.*** — C'est celui dans lequel elle tend à entraîner son point d'application. Sur la direction Δ il y a ***deux*** sens, le sens de *f* vers *f'* et le sens de *f'* vers *f*. La force appliquée s'exerce dans le sens de *f'* vers *f*.

d) ***son intensité.*** — C'est sa grandeur (exprimée en unités de force). Par exemple, la force est de 3 kgf.

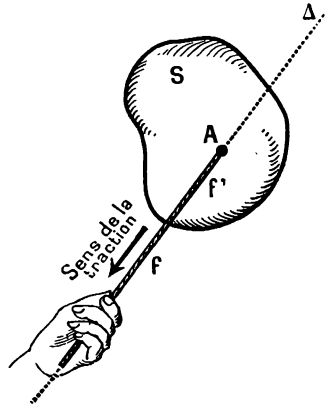


FIG. 12.

9. LE VECTEUR-FORCE. — La connaissance des quatre éléments étant nécessaire et suffisante pour qu'une force soit parfaitement définie, une représentation graphique doit les rappeler sous une forme simple.

On représente une force par un *segment de droite orienté* AB (fig. 13). Sa longueur AB est proportionnelle à l'*intensité* de la force (si la longueur *ab* représente par convention 1 kgf, on aura $\overline{AB} = 3\overline{ab}$); son *support* est la droite Δ. Le *sens* est indiqué par une pointe de flèche dessinée en B. A est le *point d'application*.

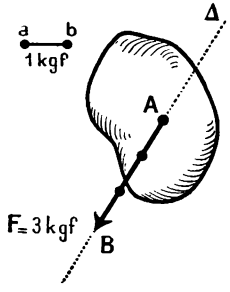


FIG. 13.

Un tel dessin est un *vecteur*, dont A est l'origine, B l'extrémité.

Une force se représente par un vecteur.

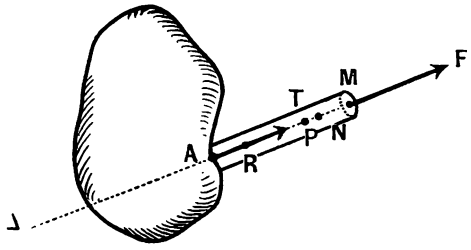


FIG. 14.

Remarque. — Il est en général *commode* de se représenter matériellement le point d'application d'une force, mais ce n'est pas indispensable.

Soit une force F appliquée au point A d'un solide, et soit Δ la direction de la force, qu'on appelle encore sa ***ligne d'action*** (fig. 14). Imaginons une tige rigide soudée au solide et de direction Δ.

Si la force F, glissant le long de sa ligne d'action, est appliquée en M, son effet sera évidemment le même, et cette propriété se conserve quelle que soit la position MNPR... du point d'application. Le point d'application pourra donc être *déplacé à volonté sur la ligne d'action* pourvu qu'il soit *rigidement lié* au corps qui supporte les effets de la force.

D. LA FORCE GRANDEUR FONDAMENTALE

10. — Les forces se rencontrent dans tous les domaines de la Physique. Pour montrer leur diversité, citons les principales catégories, avec quelques ordres de grandeur (fig. 15).

a) *FORCES MUSCULAIRES.* — La vie courante en offre de nombreux exemples : *ouvrier* tirant sur un câble ou poussant un rabot, *cycliste* appuyant sur la pédale (20 à 60 kgf), *cheval* entraînant une voiture (70 kgf pour un effort moyen, 400 kgf au « coup de collier »), *tireur* bandant un arc (30 à 100 kgf).

b) *FORCES DE PESANTEUR.* — Ces forces, exercées par la Terre, sont encore nommées ***forces gravifiques***, ou, plus simplement, ***poids*** des objets. Elles sont d'une très grande importance et offrent toutes une particularité :

En un lieu donné, la direction du poids d'un corps (direction que prend un fil à plomb au repos) est nommée **verticale** du lieu. Tous les poids sont donc des forces verticales, orientées du haut vers le bas, et l'expérience montre que dans une région peu étendue toutes les verticales sont parallèles. En faisant tourner autour d'une verticale une équerre dont un côté reste en contact avec cette droite on balaie avec l'autre côté un plan **horizontal.** Toute droite tracée dans ce plan est une **horizontale;** elle est dite *orthogonale* à toute verticale du lieu.

Les poids des objets forment une gamme extrêmement étendue (particule de fumée : 1/100 000 gf; grand navire : 50 000 000 kgf).

c) *FORCES ÉLASTIQUES.* — Ce sont elles qui provoquent les *déformations temporaires* de tous les objets qui reprennent leur forme quand on fait cesser la contrainte. Les *ressorts* des véhicules exercent des forces variant de quelques dizaines de kilogrammes-force à quelques milliers de kilogrammes-force (lourds camions).

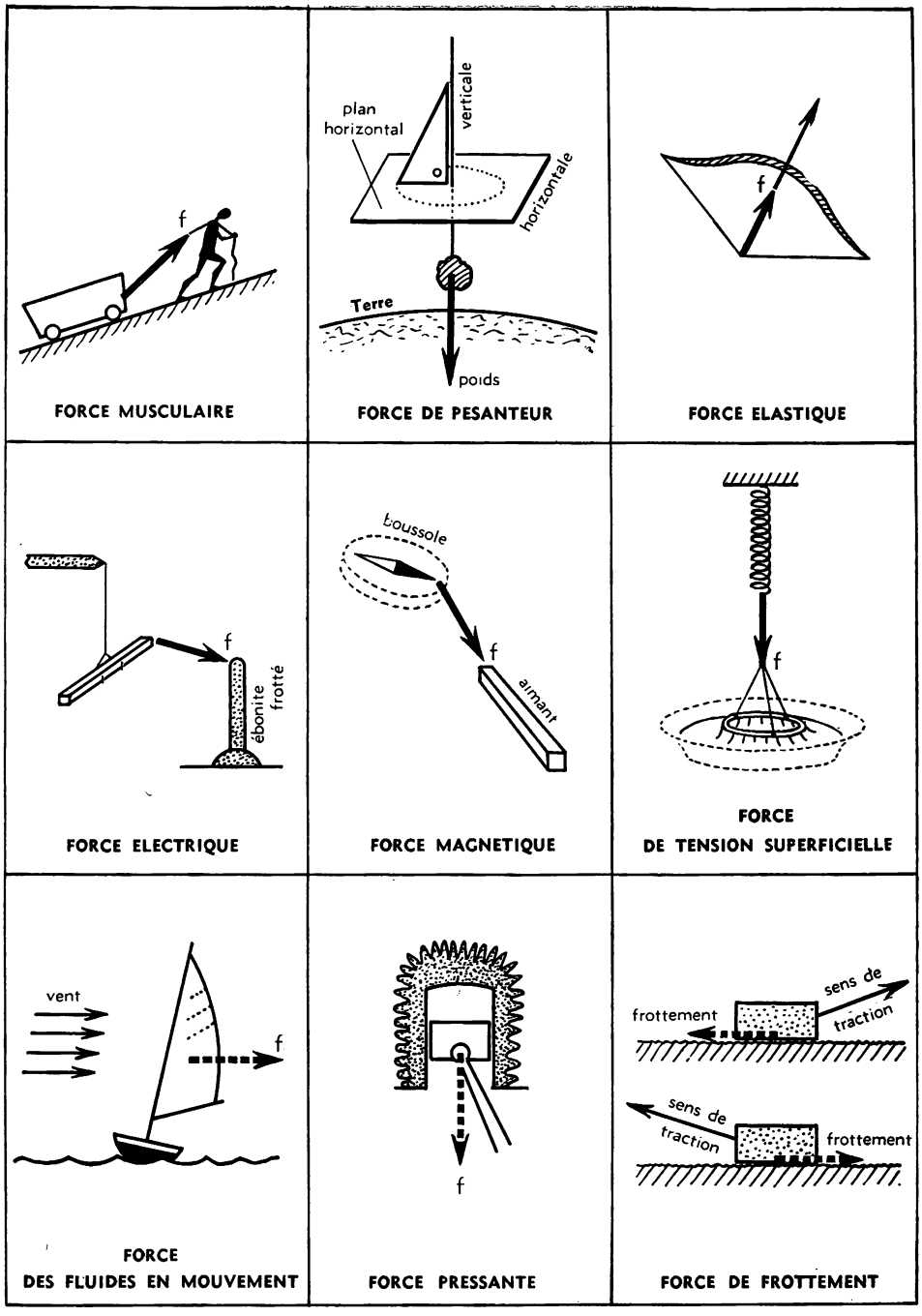


FIG. 15. — *Principales catégories de forces.*

d) *FORCES ÉLECTRIQUES.* — Une règle de *plexiglas*, librement suspendue à un fil très fin, est attirée par un bâton d'*ébonite* qu'on a frotté avec du drap (fig. 15). On dit que l'ébonite est **électrisée** et la force qu'elle développe à son voisinage est une *force électrique.* Ces forces sont généralement faibles, largement inférieures à 1 gf.

e) *FORCES MAGNÉTIQUES.* — La pointe d'une aiguille de *boussole* est attirée ou repoussée selon qu'on lui présente une extrémité ou l'autre d'un *aimant.* Entre la boussole et l'aimant se manifestent des *forces magnétiques.* Les forces magnétiques peuvent être importantes : plusieurs centaines de grammes-force entre des barreaux aimantés modernes, plusieurs centaines de kilogrammes-force pour des électro-aimants industriels.

f) *FORCES DE TENSION SUPERFICIELLE.* — Un anneau métallique fin, horizontal, soulevé lentement dans l'eau par la traction d'un dynamomètre sensible ne peut ensuite être décollé de la surface du liquide qu'au prix d'une force *supplémentaire* de quelques grammes-force. A la surface de séparation entre deux fluides (*air-eau*, ici) ou entre un fluide et un solide (*eau* et *métal*) s'exercent des forces de *tension superficielle*, appelées encore forces *capillaires*, car ce sont elles qui retiennent les liquides à l'intérieur des tubes dont le diamètre est de l'ordre de celui d'un cheveu.

g) *FORCES DES FLUIDES EN MOUVEMENT.* — Les liquides et les gaz en mouvement agissent sur les surfaces qui leur sont opposées : vent sur une *voile*, courant sur un gouvernail, *résistance de l'air* sur un véhicule rapide (50 kgf sur une automobile moderne lancée à 100 km-h).

h) *FORCES PRESSANTES.* — Elles sont créées par les *chocs* innombrables des molécules liquides ou gazeuses des fluides en état de repos apparent (Leçon 1. § 7). Ces chocs se manifestent sur les parois des solides rencontrés et tendent à les *repousser*, comme des forces de toute autre nature. On dit que les solides sont soumis à des *pressions*, d'où le nom de ***forces pressantes.*** Nous aurons l'occasion de les étudier. Exemples : Dans un *cylindre* de moteur d'automobile le piston se meut sous l'action d'une force, continuellement variable, dont la valeur maximum peut être de l'ordre de 2 000 kgf pendant un instant. Un obus est chassé d'un *canon* par une force de plusieurs dizaines de milliers de kilogrammes-force. L'ongle d'un doigt (surface de l'ordre de 1 cm^2) plongé au fond d'un verre plein d'eau, subit une force de quelques grammes-force.

i) *FORCES DE FROTTEMENT.* — On sait la difficulté qu'il y a à faire glisser un fardeau sur un sol rugueux, à dénouer une corde.... Il faut pour cela vaincre des ***forces de frottement.*** Le caractère fondamental de ces forces est de toujours s'opposer au mouvement qu'on veut imposer à un corps qui frotte au contact d'un autre. Elles nous paraissent donc nuisibles, et cependant nous avons souvent l'occasion d'en rencontrer qui présentent une utilité évidente : elles empêchent les *roues* des automobiles de patiner, les *nœuds* de se dénouer; elles permettent aux *freins* d'agir, aux assiettes de rester sur la table, même si celle-ci n'est pas rigoureusement horizontale....

Le tableau de la page 27 récapitule, sous une forme imagée, les différentes catégories de forces que nous venons de citer. Retenons que les forces sont des grandeurs très importantes. Au cours de l'étude de la Mécanique, du Magnétisme, de l'Electricité... on voit apparaître d'autres grandeurs telles que le *Travail*, la *Puissance*, la *Pression*, la *Charge électrique*, etc.... Toutes se rattachent directement à la notion de *force* qui est une ***grandeur physique fondamentale.***

EXERCICES

1. Le tableau d'étalonnage d'un ressort est le suivant :

FORCES (gf)	200	400	800	1 000	1 200	1 400	2 000
Allongements (mm)	4	8	15	21	25	28	40

Construire le graphique. Utiliser la construction pour déterminer le poids d'un objet qui, suspendu au ressort, provoque un allongement de 18 mm.
Rép. : F = 900 gf.

2. Faire un schéma indiquant comment on pourrait transformer en dynamomètre : un arc, un fil de caoutchouc.

3. On dispose d'une baleine de parapluie, d'un étau, d'une règle graduée, d'un « poids » de 100 g en laiton et d'un fil de plomb bien cylindrique, pesant 100 gf. Comment s'y prendre pour réaliser un dynamomètre et construire son graphique d'étalonnage de 0 à 200 gf?

4. Faire le schéma d'un dynamomètre à ressort à boudin travaillant « à la traction ». On supposera que le ressort s'allonge proportionnellement à la force appliquée et on représentera la graduation sur la tige, sachant que l'appareil doit fonctionner de 0 a 15 kgf.

5. Citez quelques forces de l'ordre du gramme-force, du kilogramme-force; de 10 kgf; de 100 kgf.

6. Représenter graphiquement une force horizontale, dirigée de gauche à droite, d'intensité 4 kgf (échelle : 1 cm représente 1 kgf).

7. Un cycliste pèse de tout son poids (60 kgf) sur l'axe d'une pédale. Déterminer complètement la force exercée (préciser les 4 *éléments* de cette force).

8. Rectifiez les expressions abrégées suivantes : Une force de 84 kilos, de 1,8 kgr, de 12 kg, de 138,7 kgs.

9. Rectifiez le dessin ci-contre (fig. 19) et ses notations (la longueur *ab* est exacte).
F = 7,5 kgrs.

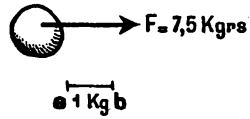


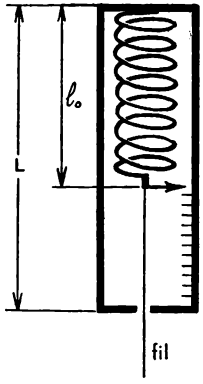
FIG. 19.

10. Pourquoi les pesons à ressort sont-ils interdits dans les transactions commerciales? Pourrait-on utiliser un peson dont la sensibilité atteindrait 1 gf et dont le défaut de fidélité atteindrait 2 gf? Dans quel cas?

11. Faire le schéma d'un dispositif permettant de multiplier par 10 la sensibilité d'un peson à ressort. A quelle condition cette amélioration serait-elle souhaitable?

***12.** L'aiguille d'un dynamomètre à anneau se déplace de 10 cm sur le cadran quand la force varie de 1 000 kgf. En admettant que les déplacements sont proportionnels aux forces, quelle est l'erreur absolue sur une mesure si on peut apprécier un déplacement de l'index de 1/2 mm?
Rép. : 5 kgf.

PROBLÈME



forces (gf)	*déplacement de l'index (mm)*
0	0
50	0
100	0
150	1
200	6
250	12
300	17
350	23
400	30
450	35
500	40

Un dynamomètre correspond au schéma ci-contre : ressort à spires jointives; longueur au repos : $l_0 = 10$ *cm*; longueur maximum : $L = 15$ *cm*. On a réalisé l'étalonnage avec des forces exactement connues; les allongements ont été mesurés à 0,5 mm près; les résultats sont rassemblés dans le tableau :

1° Construire le graphique d'étalonnage en tenant compte des incertitudes dans les mesures. Échelles : *forces* : 1 cm représentera 50 gf; *allongements* 1 cm représentera 2 mm.

2° Entre quelles limites l'appareil peut-il servir à mesurer des forces?

3° Quelle est la force qui provoque un déplacement de l'index égal à 22 $\pm$ 0,5 mm?

4° Imaginer, décrire et dessiner un dispositif permettant avec cet appareil d'obtenir sur un cadran gradué un déplacement d'index égal à 1 millimètre quand la force exercée par le ressort varie de 1/100 gf. Expliquer pourquoi le perfectionnement serait sans doute illusoire.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 5. *Étalonnage d'un ressort.*

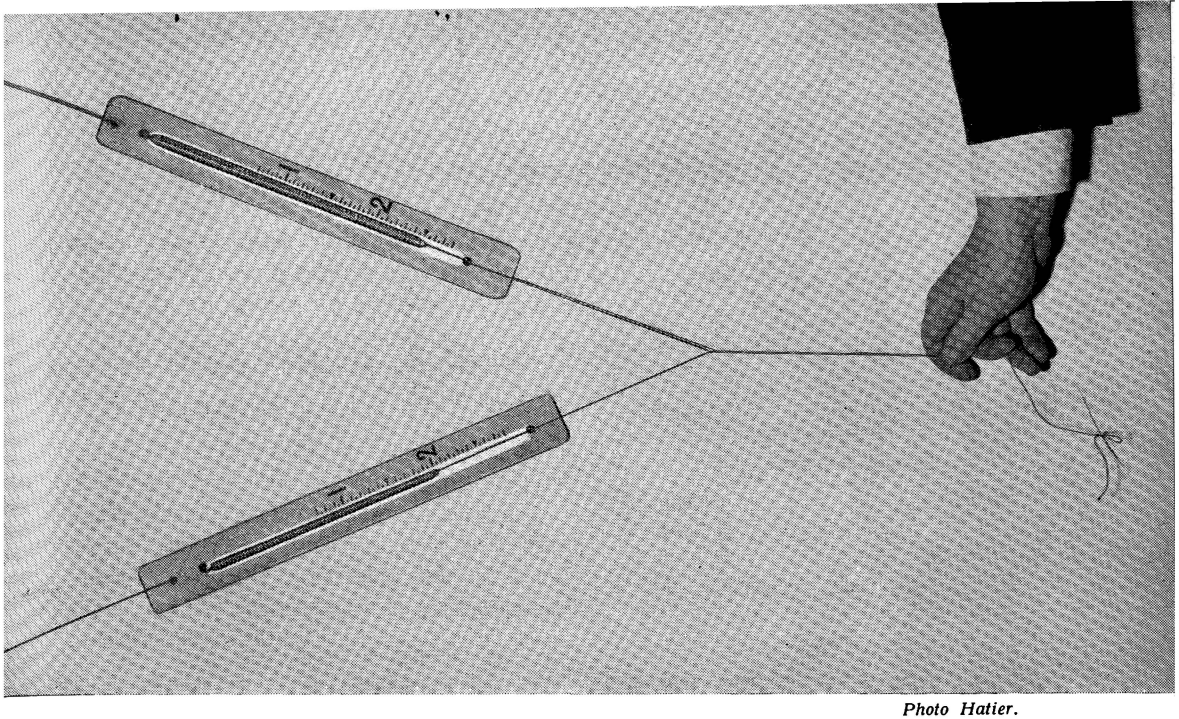


Photo Hatier.

FIG. 1. — *Chacun des deux dynamomètres est gradué de 70 à 250 gf. Déterminez graphiquement l'intensité de la force exercée par la main.*

3. COMPOSITION DES FORCES

1. COMPOSANTES ET RÉSULTANTE. — Soient plusieurs forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$... (fig. 2) appliquées au même corps solide.

Il arrive que cet ensemble (ou système) de forces puisse être remplacé par une force unique $\vec{R}$ produisant exactement le même effet. On dit alors que $\vec{R}$ est la **résultante** de $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$.... Les forces $\vec{F_1}$ $\vec{F_2}$ $\vec{F_3}$ sont les **composantes** de $\vec{R}$.

Nous allons envisager quelques cas où, les composantes étant déterminées, on peut trouver leur résultante. Nous examinerons aussi le problème inverse.

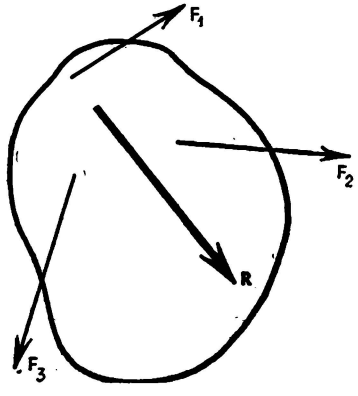


FIG. 2. — *Composantes et résultante.*

A. FORCES CONCOURANTES

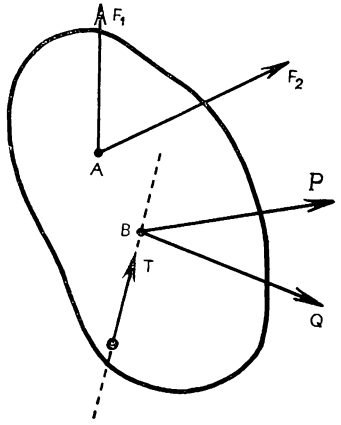


FIG. 3.

Définition : *Des forces sont dites concourantes quand leurs lignes d'action se coupent au même point.*

Exemple (fig. 3) : $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ sont concourantes en A; $\vec{P}$, $\vec{Q}$, $\vec{T}$ sont concourantes en B, car nous pouvons faire glisser $\vec{T}$ sur sa ligne d'action pour amener son point d'application en B.

Nous nous proposons de définir la résultante d'un système de forces concourantes. Pour cela, nous mesurerons les forces avec des dynamomètres *assez légers* pour que leur poids puisse être négligé dans toutes les expériences.

2. DEUX FORCES ÉGALES ET OPPOSÉES : ÉQUILIBRE. — Expérience (fig. 4) : Appliquons à un même point O (nœud par exemple) par l'intermédiaire de deux brins de fils, deux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ que nous mesurons à l'aide de deux

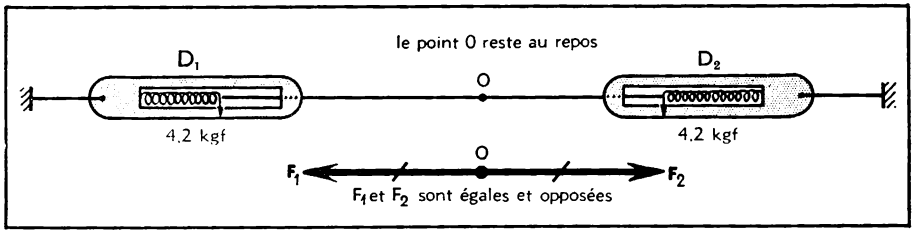


FIG. 4. — *L'équilibre résulte de l'action de deux forces concourantes de même direction, de même intensité, de sens opposés.*

dynamomètres D_1 et D_2. Quand le point O est immobile, nous constatons :

a) que les deux brins forment un *fil rectiligne;*

b) que les indications des dynamomètres sont *identiques* : $F_1 = F_2$. Nous disons que le point O est en équilibre sous l'effet de 2 forces concourantes en O, de même direction, de sens contraires (forces opposées) et égales.

Règle : *Deux forces égales et opposées se font équilibre.*

Ce résultat, qui peut être aisément vérifié pour des valeurs quelconques des forces en présence est très important; il conduit, par généralisation, à une proposition connue sous le nom de *Principe de la Statique :*

PRINCIPE : **Un point au repos, soumis à un système de forces de résultante nulle, reste au repos.**

Remarque. — Ce principe, nous l'avons implicitement admis quand nous avons gradué un ressort en appliquant à son extrémité des forces étalonnées (poids ou forces marqués) et en notant les allongements quand le dispositif était devenu *immobile.*

3. DEUX FORCES CONCOURANTES, DE MÊME DIRECTION.

a) **Même sens.** — Appliquons au même point O, par l'intermédiaire des fils *longs*, deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ de même direction, de même sens, que nous mesurerons à l'aide de deux dynamomètres D_1 D_2 *très légers*, intercalés sur les fils de traction (fig. 5).

Pour que le point O reste immobile, c'est-à-dire pour annuler les effets combinés des deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$, nous devons appliquer à O une force $\vec{F_3}$, mesurée par le dynamomètre D_3.

Le point O s'immobilise alors, et, l'ensemble présentant l'aspect de la figure nous constatons :

1° que le fil OD_3 a *même direction* que les fils OD_1 et OD_2;

2° que : $F_3 = F_1 + F_2$.

Or, le point O est en *équilibre* sous l'effet de deux forces : la résultante des deux forces F_1 et F_2 et la force F_3. Cette résultante $\vec{R}$ est donc *égale et opposée* à F_3.

L'expérience nous conduit donc à énoncer la règle de composition suivante :

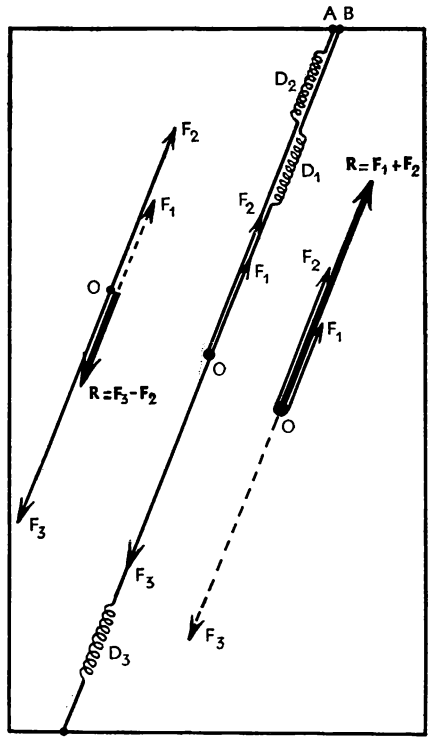


FIG. 5.

Règle : *La résultante R de deux forces concourantes de même direction et même sens a même direction, même sens que ses composantes; son point d'application est un point quelconque de la ligne d'action commune aux composantes; son intensité est égale à la somme des intensités des deux composantes.*

$$R = F_1 + F_2.$$

(Sur la fig. 5 on a représenté les trois forces F_1, F_2, R, *très légèrement décalées* pour que le dessin soit plus lisible.)

b) **Sens contraires.** — Revenons à l'expérience précédente; nous pouvons en donner une autre interprétation et dire : le point O est en *équilibre* sous l'action de deux forces : la force $\vec{F_1}$ et la résultante $\vec{R}$ des forces $\vec{F_3}$ et $\vec{F_2}$ concourantes de *même*

direction et de **sens contraires.** Cette résultante $\vec{R}$ est donc *opposée* et *égale* à $\vec{F_1}$.

Or $F_1 = F_3 - F_2$.

Ceci conduit à la règle :

Règle : ***La résultante de deux forces concourantes de même direction et de sens contraires a même direction que ses composantes et le sens de la plus grande; son point d'application est un point de la ligne d'action commune; son intensité est égale à la différence des intensités des composantes.***

4. DEUX FORCES CONCOURANTES DE DIRECTIONS QUELCONQUES.

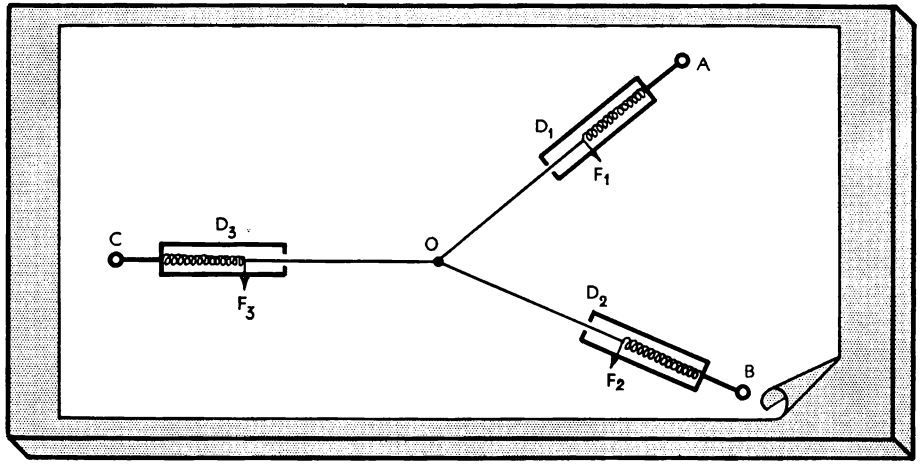


FIG. 6.

a) **Expérience.** — Sur une planche à dessin horizontale, fixons une feuille de papier (fig. 6). A l'aide de trois dynamomètres *légers*, appliquons au même point O trois forces $\vec{F_1}$ $\vec{F_2}$ $\vec{F_3}$ assez intenses, dont les directions seront matérialisées par trois fils OA, OB, OC. Laissons toute mobilité au système en évitant autant que possible les frottements sur la feuille. Le point O se place dans une position *fixe*, unique. Notons avec la pointe d'un crayon les directions OA, OB, OC; notons également les forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$.

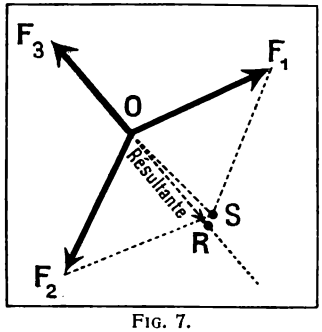


FIG. 7.

b) **Graphique. Son interprétation.** — Traçons sur la feuille les *vecteurs représentatifs* des forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$; dessinons le parallélogramme OF_1 SF_2 construit sur OF_1 et OF_2 comme côtés et traçons sa diagonale OS (fig.7).

Puisque le point O est en *équilibre*, c'est que $\vec{F_3}$ est *égale et opposée à la résultante* $\vec{R}$ *de* $\vec{F_1}$

et $\vec{F_2}$. Dessinons donc cette résultante en traçant le vecteur OR symétrique de OF_3 par rapport à O.

Pratiquement, nous trouvons que R *coïncide avec S*, d'où la règle (fig. 8) :

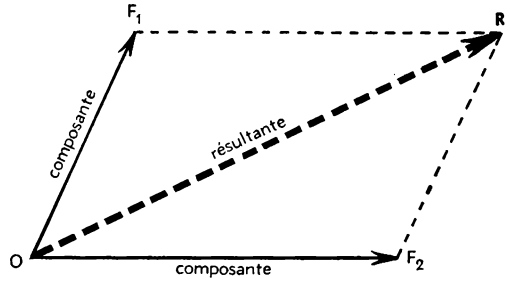


FIG. 8. — *Le parallélogramme des forces.*

Règle : *La résultante $\vec{R}$ de deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ concourantes en O est définie en direction, sens, grandeur, par la diagonale issue de O du parallélogramme de côtés OF_1 et OF_2.*

c) **Construction de la résultante.** — On peut (fig. 9) mener par l'extrémité de $\vec{F_1}$ une parallèle à $\vec{F_2}$, par l'extrémité de $\vec{F_2}$ une parallèle à $\vec{F_1}$. Leur point de rencontre est l'extrémité du vecteur $\vec{R}$.

On peut également (fig. 10) par l'extrémité de $\vec{F_2}$ mener F_2D parallèle à $\vec{F_1}$ et sur F_2D à partir de $\vec{F_2}$ et dans le sens de $\vec{F_1}$ porter une longueur F_2R égale à F_1 ; R est le point cherché.

d) **Calcul.** — En général, seule une construction géométrique permet de connaître graphiquement l'intensité de la résultante. Le calcul est cependant possible *dans quelques cas particuliers.* Exemples : deux composantes rectangulaires (Exercice 4) ; deux composantes égales faisant un angle de 120 ... 60°... (Exercice 3).

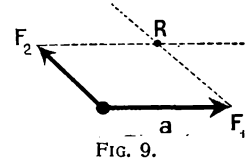


FIG. 9.

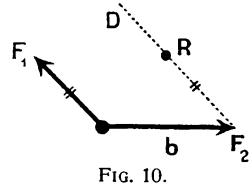


FIG. 10.

5. CAS GÉNÉRAL. NOMBRE QUELCONQUE DE FORCES. — La résultante générale R s'obtient en composant les forces deux à deux, puis les résultantes partielles deux à deux, etc., jusqu'à l'obtention d'une force *unique.*

Graphiquement, on peut, partant de l'extrémité d'un vecteur arbitrairement choisi (par exemple, $\vec{F_2}$: fig. 11) mener une *parallèle* D_1 à $\vec{F_1}$ sur laquelle on portera dans le sens $\vec{F_1}$ une longueur $F_2A = OF_1$, puis de A une *parallèle à* OF_4 sur laquelle on portera à partir de A une longueur AB égale à OF_4 et de même sens..., etc..., jusqu'à utilisation de *toutes* les forces, chacune d'elles étant utilisée *une fois* et *une seule.*

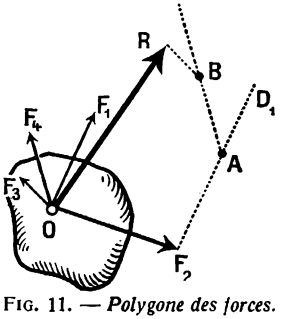


FIG. 11. — *Polygone des forces.*

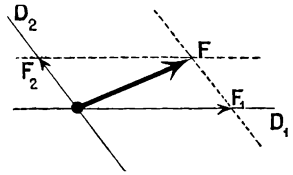


FIG. 12.

On obtiendra en définitive un *polygone incomplet* OF_2, A, B, ...R. La résultante générale s'obtient en joignant O à l'extrémité R du **polygone des forces.** L'ordre dans lequel on a composé les forces en effectuant la construction graphique n'importe pas (Exercice 5).

6. PROBLÈME INVERSE : DÉCOMPOSITION D'UNE FORCE EN DEUX AUTRES. — Il est souvent utile de pouvoir décomposer une force en deux ou plusieurs autres, plus faciles à étudier séparément.

Soit OF (fig. 12). Choisissons deux directions quelconques OD_1 et OD_2 dont le plan contient OF. Considérant OF comme la diagonale d'un parallélogramme dont les côtés se trouvent sur OD_1 et OD_2 nous mènerons de F deux parallèles à OD_1 et à OD_2. OF_1 et OF_2 sont les composantes cherchées. Chacune d'elles pourrait à son tour être décomposée en deux autres..., etc.

Cette décomposition peut d'ailleurs s'effectuer de nombreuses manières selon le problème posé (Exercices 7 et 8).

B. FORCES PARALLÈLES

Définition : *Des forces sont dites parallèles quand leurs lignes d'action sont parallèles.*

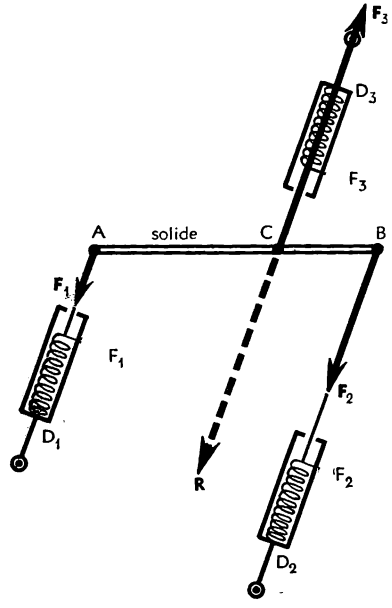


FIG. 13.

7. DEUX FORCES PARALLÈLES ET DE MÊME SENS. — Expérience. — Suivant le procédé du paragraphe 3, appliquons à un corps *léger* (tige de duralumin), deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ parallèles, que les dynamomètres D_1 et D_2 serviront à mesurer (fig. 13). Pour maintenir le solide immobile nous devons lui appliquer, en un point C, une troisième force $\vec{F_3}$. Il n'y a qu'*une seule position de* C pour laquelle $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$ sont parallèles.

Mesurons les intensités F_1, F_2, F_3 et les longueurs AC et BC; nous remarquons, quelles que soient les forces en présence, les relations suivantes :

$$F_1 \times AC \quad F_2 \times BC$$
$$F_3 = F_1 + F_2$$

Or $\vec{F_3}$ est *égale et opposée* à la résultante $\vec{R}$ des deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$; d'où la règle (fig. 14) :

Règle : ***La résultante $\vec{R}$ de deux forces $\overrightarrow{AF_1}$ et $\overrightarrow{BF_2}$ parallèles et de même sens est une force $\overrightarrow{CR}$:*** parallèle ***aux deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$, de*** même sens ***que ces deux forces, d'intensité égale*** à la somme ***des deux intensités : $F_1 + F_2$, appliquée en un point C*** intérieur ***au segment AB et tel que***

$$F_1 \times AC = F_2 \times BC. \qquad (1)$$

Si l'on a par exemple $F_2 > F_1$, il en résulte que $AC > BC$; le point C est donc plus près du point d'application de la **plus intense** des deux forces.

Calcul de la position du point C. — *Soit par exemple* $F_1 = 6$ kgf, $F_2 = 2$ kgf, $AB = 80$ cm. Posons $AC = x$ *et écrivons la relation* (1) :

$$F_1 \times x = F_2 (AB - x)$$
$$6x = 2(80 - x) = 160 - 2x$$
$$x = 20 \text{ cm}.$$

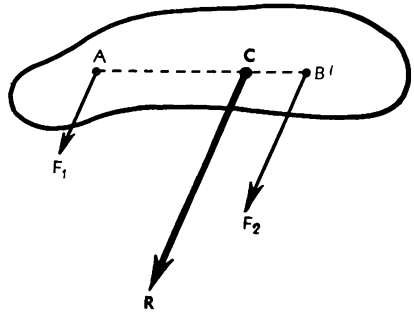


FIG. 14.

8. DEUX FORCES PARALLÈLES ET DE SENS CONTRAIRES. — La détermination expérimentale de la résultante peut s'effectuer par le moyen précédent. Nous nous contenterons d'énoncer la règle de composition (fig. 15) :

Règle : ***La résultante de deux forces parallèles de sens contraires $\overrightarrow{AF_1}$ et $\overrightarrow{BF_2}$ est une force $\overrightarrow{CR}$:*** parallèle ***aux deux composantes, de*** même sens ***que la plus grande, d'intensité égale*** à la différence ***des intensités des deux composantes, appliquée en un point C*** extérieur ***au segment AB, et tel que***

$$F_1 \times AC = F_2 \times BC.$$

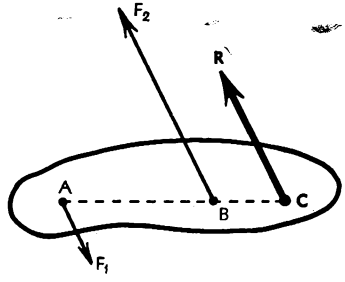


FIG 15.

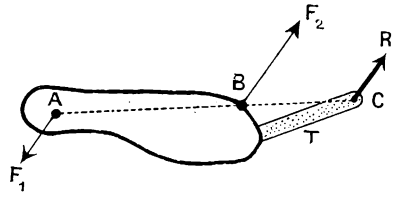


FIG. 16.

Remarques : 1. Le système des forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ peut donc être remplacé par une force unique $\vec{R}$ qui serait appliquée en C. Le point C peut parfaitement se trouver *à l'extérieur du corps auquel s'appliquent les deux forces* $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$. C'est le cas de la figure 16. Rien n'est cependant changé au résultat de l'action des forces : le système $\vec{F_1}$ $\vec{F_2}$ agit comme le ferait une force $\vec{CR}$ dont le point d'application C serait *rigidement lié* au solide (par une tige T quelconque).

2. Un cas très particulier se présente quand F_1 et F_2 sont égales. Elles forment alors un ***couple.*** Etant donnée son importance, le *couple,* sous sa forme générale, sera étudié au chapitre suivant.

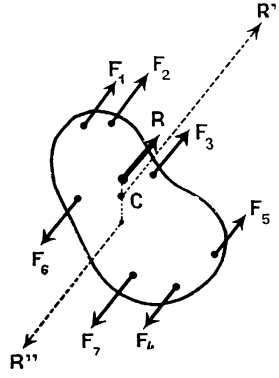


FIG. 17.

9. CENTRE DES FORCES PARALLÈLES. — Soit un corps solide soumis à un certain nombre de forces parallèles : $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$..., $\vec{F_6}$, $\vec{F_7}$... (fig. 17).

En composant toutes les forces de même sens que F_1, on obtiendra une *résultante* $\vec{R'}$. En composant toutes les forces de sens opposé, on obtiendra de même $\vec{R''}$. $\vec{R'}$ et $\vec{R''}$ composées à leur tour fourniront la *résultante générale* $\vec{R}$.

Le point d'application de cette résultante porte le nom de ***centre des forces parallèles.***

Sa position ne change évidemment pas si les intensités de *toutes* les forces sont multipliées par le même facteur, ou si la direction commune à *toutes* les forces est changée.

EXERCICES

1. Sur la figure 18, $F_1 = 3$ kgf; $F_2 = 2{,}3$ kgf. Quelle force réalisera l'équilibre?

Rép. : R = 0,7 kgf.

FIG. 18.

2. Sur la figure 19, $F_1 = 3$ kgf; $F_2 = 6$ kgf. Quelle force réalisera l'équilibre?

Rép. : R = 9 kgf.

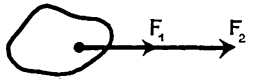


FIG. 19.

3. Définir la résultante $\vec{R}$ des forces égales $\vec{F}$ dans les cas des figures ci-dessous (fig. 20).

Chercher les angles que peuvent faire les directions de deux forces égales dont on peut déterminer la résultante par le calcul.

Rép. : $R_A = 0$; $R_B = F\sqrt{2}$; $R_C = F$; $R_D = 0$; $R_E = F\sqrt{3}$.

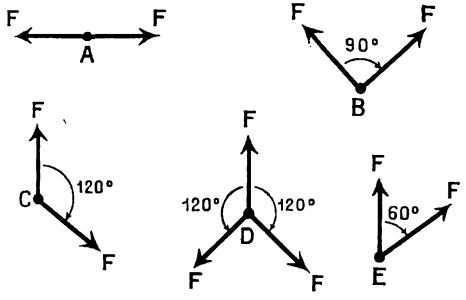


FIG. 20.

4. Deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ sont appliquées au corps A comme l'indique la figure 21. Calculer l'intensité de leur résultante.

Rép. : R = 5 kgf.

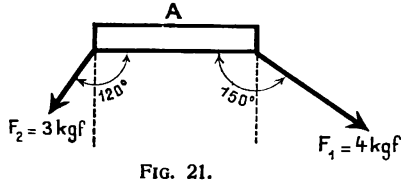


FIG. 21.

5. Les forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$, $\vec{F_4}$ sont rectangulaires (fig. 22). Construire leur résultante générale. Vérifier graphiquement que le résultat ne dépend pas de l'ordre dans lequel on compose les forces.

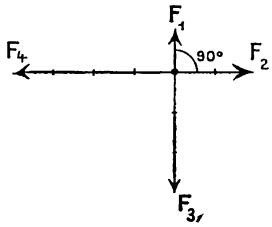


FIG. 22.

6. Montrer que la résultante de deux forces concourantes a une intensité :

a) inférieure à la somme de leurs intensités;

b) supérieure à la différence de leurs intensités.

7. Décomposer une force OR en deux composantes dont :

l'une OF_1 a comme support une droite Δ;

l'autre a comme grandeur un segment $\overline{ab}$ donné.

Discuter la possibilité du problème.

8. Décomposer une force F = 10 kgf en deux forces concourantes de 7 kgf chacune.

9. Un cheval et un âne tirent ensemble sur la barre transversale AB d'une voiture avec deux forces F_1 et F_2; $F_1 = 2F_2$. En quel point C doit-on accrocher le véhicule?

Rép. : $AC = \frac{AB}{3}$.

10. AF_1 et BF_2 sont deux forces parallèles, de même sens, valant respectivement 4 kgf et 3 kgf. AB = 70 cm. Définir leur résultante R, appliquée en C.

Même question si les forces sont de sens contraires.

Rép. : même sens : R = 7 kgf, AC = 30 cm. Sens contraires : R′ = 1 kgf, AC = 210 cm.

11. AF_1 et BF_2 sont deux forces parallèles et de même sens valant 3 kgf et 2 kgf.

Déterminer le point d'application C de la résultante (AB = 50 cm).

Valeur de la résultante quand F_1 et F_2 tournent de 45°

a) dans le même sens;

b) en sens inverse.

12. Aux trois sommets d'un triangle on applique trois forces égales, parallèles, de même sens : F. Définir complètement leur résultante.

Rép. : R = 3F, appliquée au point de concours des médianes.

13. Un homme et un enfant portent un seau pesant 30 kgf en l'accrochant à un bâton de 2 m dont ils saisissent chacun une extrémité. Que effort développe chacun d'eux si le seau est accroché à 1,20 m de la main de l'enfant?

Rép. : Homme : 18 kgf. Enfant : 12 kgf.

14. Un poids de 100 kgf s'applique à une poutre horizontale par l'intermédiaire de deux cordes *OA* et *OB* disposées comme l'indique la figure 23. Calculer en kgf les tensions des trois cordes *OA*, *OB*, *OM*.

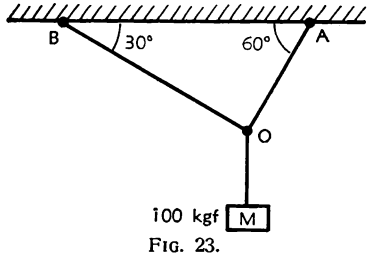


FIG. 23.

15. Un poids de 100 kgf est appliqué à l'extrémité d'une console formée par deux tiges *AB* et *CB* (fig. 24). Calculer les forces supportées par les deux tiges et figurer vectoriellement les efforts appliqués *au mur*, en *A* et *C*.

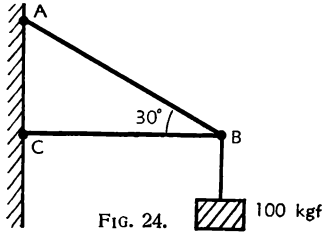


FIG. 24.

16. Une potence *CB* s'appuyant sur un mur vertical en *C* est reliée au même mur par un câble *AB* horizontal (fig. 25). Sachant que la résistance du câble à la traction ne peut dépasser 500 kgf et que la résistance de la barre *BC* à la compression ne peut dépasser 1000 kgf calculer le poids maximum du fardeau que l'on peut accrocher en *B*.

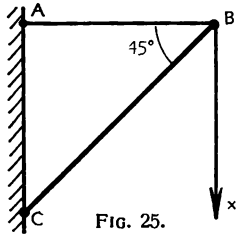


FIG. 25.

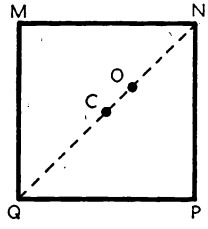
PROBLÈMES

1. On utilise trois lanières de caoutchouc identiques : A_1, A_2, A_3. Chacune d'elles, prise au repos, non étirée, a une longueur $l_0 = 40$ *cm*. Quand on applique à une de ses extrémités une force $\vec{F}$, elle prend un allongement proportionnel à cette force. Pour $F = 10$ *kgf* l'allongement est *40 cm*.

1° Montrer qu'entre la force F et la longueur totale l existe une relation telle que

$$F = k.l - A$$

k et A étant deux termes constants. Déterminer les valeurs numériques de k et A en prenant comme unité de force le kilogramme-force et comme unité de longueur le centimètre.



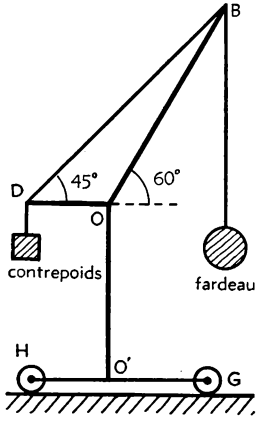
2° Les trois branches élastiques précédentes ont une extrémité commune *O*. Les deux extrémités libres de A_1 et A_2 sont attachées au sommet *N* d'un cadre carré *MNPQ* de côté *0,8 mètre*. L'extrémité libre de A_3 est fixée au sommet *Q* opposé à *N* sur la diagonale *NQ*. Déterminer la position du point *O* commun aux trois branches quand il y a équilibre (on calculera la distance de *O* au centre *C* du cadre). Quelles sont alors les forces exercées par les trois lanières?

3° On détache de *N* l'extrémité de la branche A_2 et on exerce sur cette branche une traction dirigée suivant la diagonale MP. Le point commun *O* vient alors dans une position *O'* telle que l'angle des branches A_1 et A_3 est *120°*. Calculer la longueur que prend alors la branche A_2 et les forces exercées par les trois branches.

On prendra $\sqrt{2} \simeq 1{,}4$ et $\sqrt{3} \simeq 1{,}7$.

2. Un appareil de levage (grue) peut être schématisé par une carcasse indéformable (voir fig.) formée de tiges métalliques assemblées : *OB*, *OD*, *DB*, *OO'*, *GH*. Les points *G*

et H figurent les essieux d'un chariot de roulement.



On suspend en B un fardeau de poids F En D est appliqué un contrepoids, d'intensité P, tel que la résultante des forces parallèles $\vec{F}$ et $\vec{P}$ passe par O et se trouve dirigée suivant OO'.

On donne : $OB = 6\,m$; $O'H = 2\,m$; $O'G = 3\,m$; $F = 500\ kgf$. Dans tout le problème on négligera les poids des diverses tiges et on prendra :

$$\sqrt{3} = 1{,}73; \qquad \sqrt{2} = 1{,}41.$$

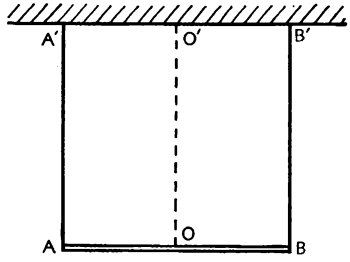
1° Calculer la force $\vec{P}$.

2° Quelle est la force de compression $\vec{C_1}$ supportée par la tige OD et la force de tension $\vec{T}$ le long de la tige DB.

3° Déterminer graphiquement (règle, compas, rapporteur) la force de compression $\vec{C_2}$ supportée par la tige OB. *Echelle* : 10 kgf seront représentés par 1 mm. Indiquer l'intensité de cette force, mesurée sur le graphique.

4° Quelle est la force supportée par chacun des essieux?

3. Un « trapèze » est formé d'une barre horizontale AB soutenue par deux cordes verticales AA' et BB'; O est le milieu de AB, O' celui de $A'B'$. Les longueurs AB, AA', BB' sont toutes égales à *1 mètre*. Une corde ne peut supporter, sans se rompre, une force supérieure à *50 kgf*. Dans tout le problème on négligera le poids des cordes et celui de la



barre. On prendra : $\sqrt{3} = 1{,}73$.

1° Un élève, pesant 60 kgf, se suspend en un point C à *10 cm* du point O. Calculer l'effort subi par chacune des cordes.

2° Montrer que le point C ne peut occuper qu'une portion de AB; la déterminer.

3° Les deux extrémités A' et B' des cordes sont réunies et attachées ensemble au point O'. L'élève se suspend en O. Calculer la tension des cordes et la force de compression supportée par la barre.

4° A' et B' étant toujours réunis en O' et le poids de *60 kgf* étant appliqué en un certain point D de AB, l'équilibre s'établit quand AB fait un angle de *75°* avec la verticale. Déterminer graphiquement (règle, compas, rapporteur) la traction subie par chacune des deux cordes et la distance OD.

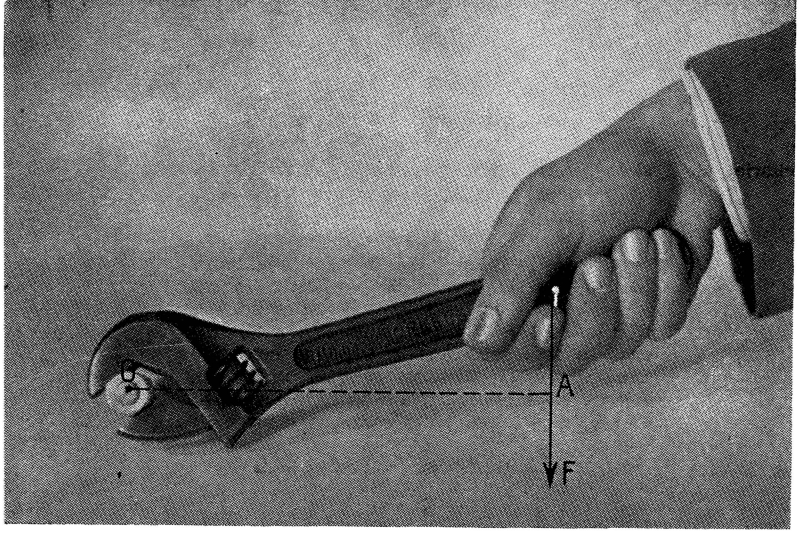


Photo Hatier.

FIG. 1. — **Moment d'une force.** *La force intervient ici par son* moment par rapport à l'axe O *(produit de l'intensité F par le bras de levier OA).*

4. MOMENT D'UNE FORCE. COUPLE

A. MOMENT D'UNE FORCE

Jusque-là nous avons appliqué à des solides des forces concourantes ou parallèles qui tendaient à entraîner ces corps dans une direction donnée. Il pouvait en résulter un déplacement appelé ***translation*** dans la direction de la résultante.

Il existe également des cas où les forces tendent à produire un pivotement, une ***rotation :*** le mouvement des roues d'une automobile, la rotation des aiguilles d'une montre, l'entraînement d'une scie circulaire sont dûs à des forces de ce genre.

1. NOTION EXPÉRIMENTALE DU MOMENT D'UNE FORCE PAR RAPPORT A UN AXE. — Soit un solide parfaitement mobile autour d'un axe *horizontal,* tel qu'une roue de bicyclette alourdie en quelque point de la jante et tournant librement autour de son moyeu, ou encore une simple plaque de bois montée sur un roulement à billes (fig. 2). Nous nous proposons de maintenir ce solide immobile dans une position marquée par la coïncidence d'un *index* ***i*** porté par lui et d'un *repère extérieur fixe* ***r***. Pour cela nous devons lui appliquer des forces, à l'aide de *dynamomètres* ou d'*objets suspendus,* mais nous veillerons à ce que ces forces soient toutes contenues dans *un plan vertical perpendiculaire* à l'axe de rotation et nous prendrons ce plan comme plan de figure.

Soit F l'intensité de la force *verticale* qui, appliquée au point A, réalise cet équilibre; cette force est unique. Mais nous pouvons obtenir le même résultat en choisissant successivement les points d'applications A_1, A_2, A_3, ... à condition d'exercer en ces points des forces verticales F_1, F_2, F_3, ... convenables. Dans tous les cas nous observons que l'intensité de la force doit augmenter quand sa ligne d'action se rapproche de l'axe O.

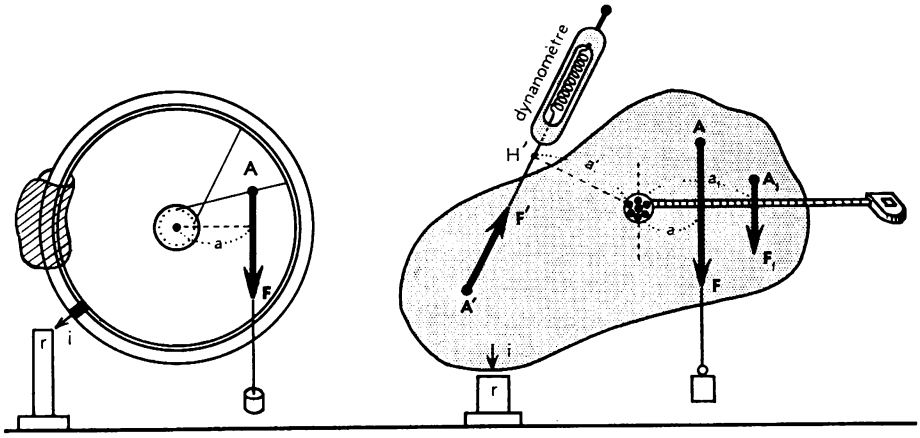


FIG. 2. — *Les différentes forces agissent par leurs* ***moments.***

Avec une force *non verticale* $\vec{F'}$ on peut aussi réaliser l'équilibre du solide; son intensité diminue quand sa ligne d'action s'éloigne de O.

Pour chacun des essais, mesurons, quand l'équilibre est atteint, *l'intensité de la force* ***F*** *et la longueur* ***a*** *de la perpendiculaire abaissée de O à la ligne d'action.* Groupons les résultats dans un tableau :

Expérience n°	F (kgf)	a (cm)	produits F.a
1	4	16,5	66
2	3	22	66
3	2,5	26	65
4	6	10,8	64,8
5	10	6,5	65

Comme nous remarquons que si F est doublé, *a* diminue de moitié, cela nous suggère de calculer les *produits F.a*; une colonne du tableau leur est consacrée. Aux erreurs d'expériences près, nous pouvons considérer ces produits comme *égaux*, ce qui nous mène à la conclusion suivante :

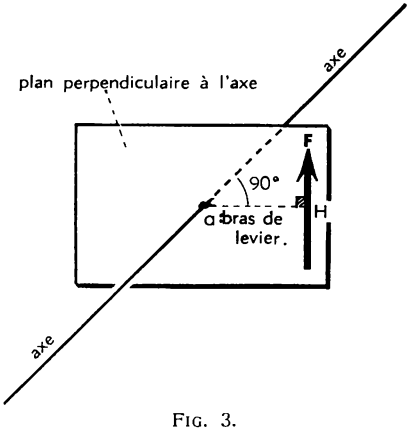


FIG. 3.

L'efficacité d'une force appliquée à un solide mobile autour d'un axe orthogonal à la direction de la force ne dépend que du produit de l'intensité de la force ***F*** *par la distance* ***a*** *de l'axe à la direction de la force. Ce produit* ***F.a*** *est nommé* ***moment de la force*** *par rapport à l'axe; la longueur* ***a*** *est le* ***bras de levier*** *de la force* (fig. 3).

Définition : ***Le moment, par rapport à un axe, d'une force située dans un plan perpendiculaire à l'axe est numériquement égal au produit de l'intensité de la force par la distance de l'axe à sa ligne d'action.***

On écrit :

$$\mathcal{M}_{F/O} = F.a.$$

Remarques — *FORCES NON ORTHOGONALES A L'AXE* (fig. 4).

a) Forces de moment nul. — Soit une force $\vec{F_1}$ appliquée au solide en A et dont la direction rencontre l'axe. L'expérience montre que l'effet d'une telle force, dans l'équilibre, est nul. Son bras de levier est d'ailleurs nul. Son moment est *nul.*

Par contre une force $\vec{F_2}$, appliquée en B et de ligne d'action parallèle à l'axe possède bien un bras de levier de longueur b. Mais l'expérience montre qu'elle ne peut cependant, quels que soient son intensité et son point d'application, ni favoriser, ni contrarier la rotation du solide. *Nous admettrons qu'une force parallèle à un axe a un moment nul par rapport à cet axe.*

b) Force quelconque. — Une force $\vec{F_3}$ de ligne d'action quelconque peut être remplacée par ses composantes. Il existe un plan parallèle à l'axe et contenant $\vec{F_3}$. Décomposons $\vec{F_3}$ suivant deux directions de ce plan :

CX, parallèle à l'axe porte la composante $\vec{f_x}$
CY, orthogonale à l'axe porte la composante f_y.

Le moment de la composante $\vec{f_x}$ est nul; celui de la composante $\vec{f_y}$ est numériquement égal au produit de l'intensité f_y par le bras de levier a. *Ce produit* $f_y.a$ *mesure le moment de* $\vec{F_3}$ *par rapport à l'axe.*

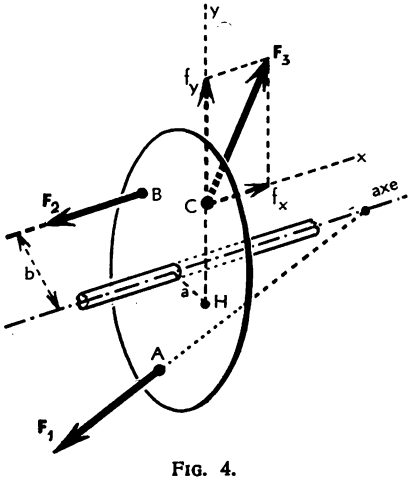


FIG. 4.

2. UNITÉS DE MOMENT. — Le nombre qui exprime le moment d'une force dépend des unités de force et des unités de longueur. Les unités de moment en dérivent :

— ***le mètre*** × ***kilogramme-force (m.kgf)*** *est le moment d'une force de* 1 *kilogramme-force agissant avec un bras de levier de* 1 *mètre.*

— ***le mètre*** × ***newton (m.N)*** *est le moment d'une force de* 1 *newton agissant avec un bras de levier de* 1 *mètre.*

— ***le centimètre*** × ***dyne (cm.dyne)*** *est le moment d'une force de 1 dyne agissant avec un bras de levier de 1 centimètre.*

Exemple d'application (fig. 5) : *Pour serrer un écrou on utilise une clef de longueur OA = 25 cm. La force exercée appliquée en A est de 5 kgf et sa direction fait un angle de 60° avec la direction OA. Calculer le moment de la force appliquée, par rapport à l'axe O.*

Le bras de levier est :

$$a = \mathrm{OH} = \mathrm{OA}\sin 60° = 25 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \simeq 21{,}5 \text{ cm.}$$

Le moment est donc :

$$\mathcal{M}_{F/O} = 0{,}215 \times 5 = 1{,}075 \text{ m.kgf}$$
$$= 0{,}215 \times 5 \times 9{,}8 = 10{,}5 \text{ m.N}$$

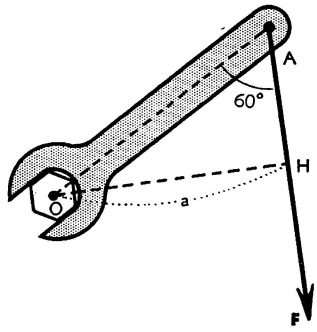


FIG. 5. — *Clef dynamométrique.*

La figure 6 représente une *clef dynamométrique* permettant de contrôler le moment appliqué à un écrou au moment du serrage. Elle comporte en principe une *tête* destinée à recevoir l'écrou, un *manche* terminé par une poignée à laquelle sont appliquées les forces. Quand on exerce celles-ci la tige se déforme légèrement, entraînant un *cadran* qui se déplace devant la pointe d'une *aiguille*. L'aiguille, soudée à la tête et ne subissant de ce fait aucune déformation, indique directement, après étalonnage de l'appareil, le *moment* de la force appliquée.

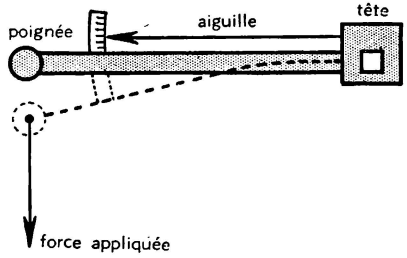


FIG. 6.

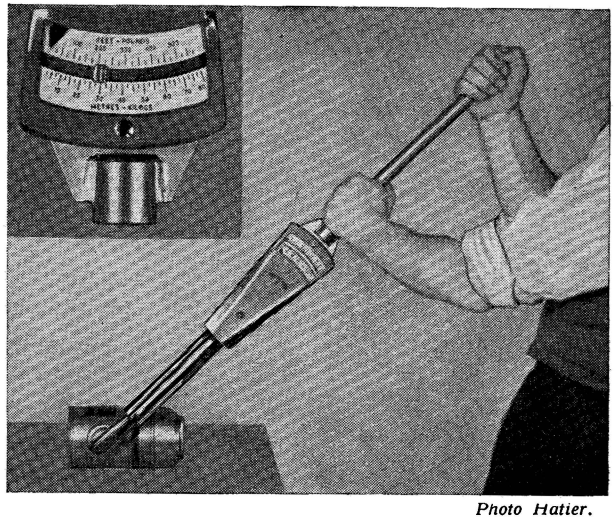


FIG. 7. — ***Blocage d'un écrou à l'aide d'une clef dynamométrique.*** **En haut, à gauche :** *le cadran de l'appareil, avec son index, dont le déplacement, devant la graduation, donne la valeur du moment appliqué, en* ***m.kgf.*** **(feet-pounds** *: mesures anglo-saxonnes;* **mètres-kilogs** *: abréviation incorrecte de la Mécanique appliquée).*

Photo Hatier.

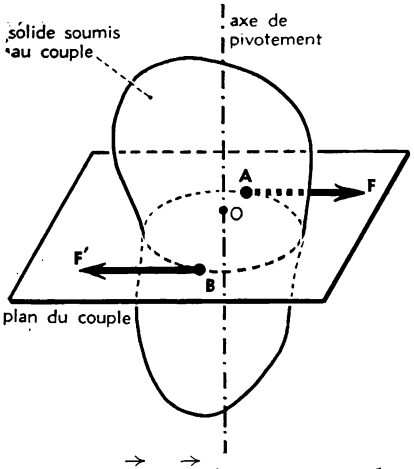


FIG. 8. — $\vec{F}$ *et* $\vec{F'}$ *forment un* ***couple.***

B. COUPLE

Définition : ***Un couple est un système de deux forces parallèles, égales, de sens contraires appliquées à un même solide.***

Le plan défini par les deux forces est nommé ***plan du couple*** (fig. 8).

3. EFFET D'UN COUPLE : SON MOMENT.

1. UN COUPLE N'ADMET PAS DE RÉSULTANTE. — Quand un couple agit seul, à l'exclusion de toute autre force, sur un corps solide libre, on n'observe jamais de déplacement latéral, mais un *pivotement* autour d'un axe perpendiculaire au plan du couple. Un couple n'a donc pas de force résultante.

Le raisonnement permet d'ailleurs de prévoir le résultat.

a) *Quelle serait, en effet, l'intensité de la résultante de* $\vec{F}$ *et* $\vec{F'}$ *s'il en existait une?* D'après la règle de composition des forces parallèles on devrait avoir, comme intensité :

$$R = |F - F'|.$$

Comme $F = F'$, l'intensité serait *nulle.*

b) *Où serait son point d'application?* En un point C extérieur au segment AB, tel que

$$F.AC = F'.BC.$$

On devrait avoir AC = BC, ce qui rejette le point C à *l'infini.*

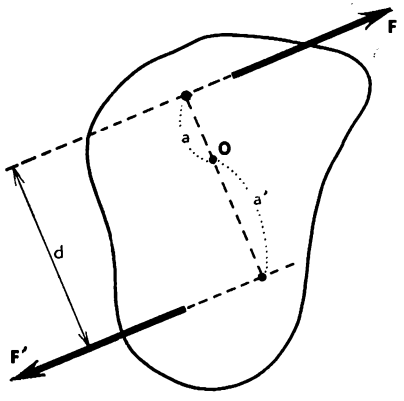


FIG. 9.

2. PIVOTEMENT ET MOMENT DES FORCES. Puisque la rotation s'effectue autour de l'axe de trace *O*, perpendiculaire au plan des deux forces pris comme plan de figure, il est naturel d'attribuer l'effet du couple à la *somme* des moments des deux forces par rapport à cet axe (fig. 9). Si a et a' sont les deux bras de levier, cette somme est :

$$\text{Somme des moments} = F.a + F'.a' = F(a + a').$$

La longueur $a + a' = d$ est appelée ***bras de levier*** du couple.

C'est le produit ***F.d*** *qui caractérise l'effet de pivotement.*

3. MOMENT PAR RAPPORT A UN AXE QUELCONQUE. — Supposons maintenant que le solide, soumis à des actions autres que celle du couple $(\vec{F}, \vec{F'})$ tourne autour d'un axe *quelconque* de trace O_1, *perpendiculaire au plan du couple* (fig. 10). Voyons par quelle grandeur peut s'évaluer la contribution de $\vec{F}$ et celle de $\vec{F'}$ à cette rotation; nous devons pour cela envisager la somme des moments de $\vec{F}$ et de $\vec{F'}$ par rapport à O_1 :

$$\mathfrak{M}^t \text{ de F} = F.a_1$$
$$\mathfrak{M}^t \text{ de F'} = F'.a'_1.$$

Mais $\vec{F}$ et $\vec{F'}$ ont visiblement ici des effets *antagonistes*; leurs actions s'opposent au lieu de s'ajouter. Nous devons en tenir compte en attribuant aux grandeurs des deux moments des *signes contraires.*

Si un *sens positif de rotation* est choisi (par exemple pour nous qui regardons la figure le sens inverse de celui des aiguilles d'une montre) le moment de $\vec{F}$ qui tend à entraîner le solide dans le sens positif est *positif*; celui de $\vec{F'}$ est *négatif.* La somme des moments devient une **somme algébrique :**

Somme des moments $= F.a_1 - F'.a'_1.$

Et, comme $F = F'$:

Somme des moments $= F\,(a_1 - a'_1)$
$= -F\,(a'_1 - a_1).$

Or, la différence $(a'_1 - a_1)$ est précisément le bras de levier d.

Donc :

Somme des moments $= -F.d.$

En résumé, l'effet des deux forces qui forment le couple est toujours numériquement exprimé par le moment du couple; le signe — indique, ici, que le couple appliqué tend à faire tourner le solide dans le sens contraire au sens positif conventionnellement choisi.

Généralisons : *puisque l'action d'un couple est la même par rapport à tout axe perpendiculaire à son plan, on peut, sans préciser aucun axe, nommer* ***moment du couple*** *le produit F.d*

$$\mathfrak{M}^t = \boldsymbol{F.d.}$$

Un couple est donc entièrement caractérisé par son moment.

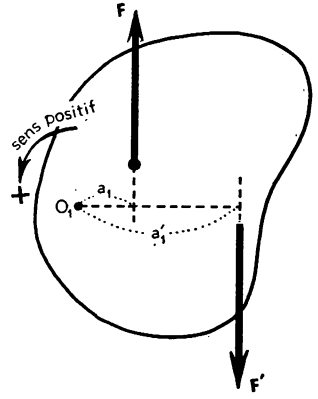


FIG. 10. — *Le moment d'un couple doit être considéré comme une grandeur algébrique.*

4. LANGAGE HABITUEL. — L'usage s'est établi de remplacer, dans le langage courant, les mots *moment du couple* par le simple mot *couple*. Deux forces de 4,5 kgf chacune formant un couple dont le bras de levier est 2 m, on devrait dire et écrire :

$$\textit{Moment du couple} = 4{,}5 \times 2 = 9\ m\ .\ kgf.$$

On énonce, plus simplement :

$$\textit{Couple} = 9\ m\ .\ kgf.$$

Il va sans dire, en effet, que les unités de moment des forces (§ 2) sont également employées pour exprimer les moments des couples.

5. REPRÉSENTATION D'UN COUPLE. — On peut représenter un couple en traduisant complètement, par un seul symbole, l'effet de rotation qu'il tend à produire.

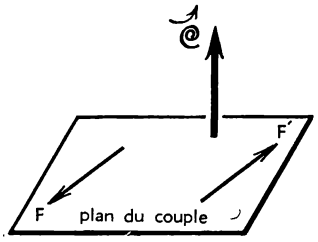


FIG. 11. — *Représentation symbolique d'un couple par un vecteur : $\overset{\curvearrowright}{C}$.*

Un couple est figuré par un vecteur : *vecteur* $\overset{\curvearrowright}{C}$ (fig. 11), ayant

— pour *point d'application* : un point quelconque du plan du couple,

— pour *direction* : une perpendiculaire au plan du couple,

— pour *sens* : celui dans lequel progresse un tire-bouchon qui tourne dans le sens des forces qui forment le couple,

— pour *intensité* : la grandeur du moment du couple.

6. EXEMPLES DE COUPLES. — Il est facile de reconnaître un couple quand deux forces, appliquées à un même corps solide, sont égales, de même direction, de sens contraires et nettement distinctes; il est cependant assez rare qu'il en soit ainsi, car les points d'applications sont souvent mal définis, comme d'ailleurs les directions et les intensités. Nous distinguerons, par commodité, trois cas :

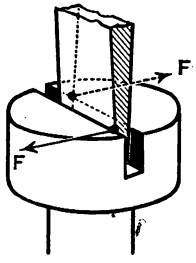


FIG. 12.

a) *LES DEUX FORCES SONT « APPARENTES ».* — *Exemples :* action de la main sur les extrémités du manche d'un tire-bouchon, action d'une lame de tournevis dans la rainure d'une vis (fig. 12), action des deux mains appuyant et tirant « également fort » sur un guidon de bicyclette.

b) *UNE SEULE DES FORCES EST « APPARENTE ».* — Quand nous appuyons sur l'extrémité du bec de cane d'une serrure, quand, *d'une main*, nous faisons tourner le volant d'une automobile, quand nous ouvrons ou poussons une porte (fig. 13) il nous

semble qu'*une seule* force s'exerce sur la poignée, sur le volant, sur la porte. En réalité une autre force s'exerce, mais son point d'application *passe par l'axe* de la poignée, par l'axe de la tige du volant, par l'axe autour duquel la porte pivote sur ses gonds. Le moment de cette autre force est nul; elle existe cependant; elle est appliquée par le support de l'axe sur le solide qui tourne.

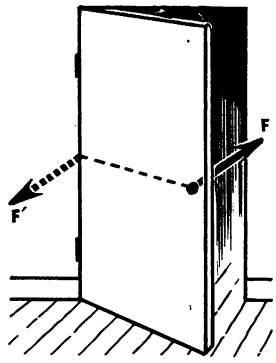


FIG 13.

c) *AUCUNE DES FORCES N'EST « APPARENTE »*. — Le passage du courant électrique dans les enroulements d'un moteur, l'arrivée de la vapeur sur les aubes d'une turbine, le défilé de l'air entre les lames des ailes d'un moulin à vent produisent des forces capables de faire tourner ces machines sans qu'aucune de ces forces ne se montre nettement avec ses quatre éléments habituels. On dit cependant que les rotations sont dues à des *couples moteurs*, car on ne peut les empêcher qu'en opposant un couple antagoniste de moment convenable.

FIG. 14. *Transmission d'un* ***couple moteur*** *à un axe de rotation.*

L'exemple qui suit montrera l'intérêt particulier des couples dont les forces restent indéfinies.

7. COUPLE DE TORSION.

a) *TORSION D'UN FIL*. — Soit un fil cylindrique, d'axe *OO'* (fig. 15), homogène (fil d'acier, de verre, de nylon...). Une extrémité *O* est prise dans un étau et immobilisée; l'autre extrémité *O'* porte une tige *AB*, perpendiculaire à *OO'*. Si on exerce *A* et *B* deux forces $\vec{F}$ parallèles, égales, de sens contraires, le fil subit une déformation : il se tord. L'angle $\theta = \widehat{AO'A'}$ mesure cette déformation; l'***angle de torsion.***

A cause de son élasticité le fil tordu tend à reprendre sa forme primitive; il oppose au couple des forces $\vec{F}$ un ***couple de torsion.***

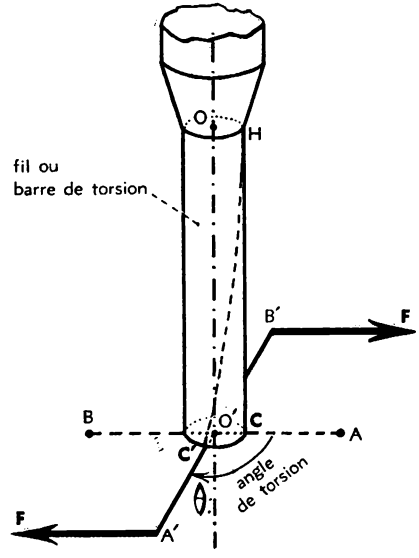


FIG. 15. — *Torsion d'un fil.*

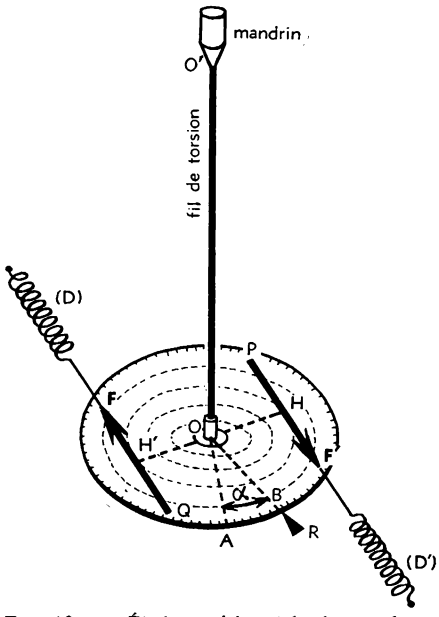


FIG. 16. — *Étude expérimentale du couple en fonction de l'angle de torsion.*

b) *RELATION ENTRE LE COUPLE ET L'ANGLE DE TORSION.* — **Expérience** (fig. 16). — Un fil (ou une tige) de torsion, de direction verticale, est serré à la partie supérieure dans un mandrin. A la partie inférieure il est fixé au centre d'un disque horizontal gradué, portant un certain nombre de cercles ponctués, de centre *O*. Quand le fil n'est pas tordu la position du disque est telle que l'extrémité *A* d'un de ses rayons coïncide avec un *repère extérieur fixe R*. En deux points *P* et *Q* sont attachés deux fils le long desquels on exerce des forces horizontales que mesurent les dynamomètres (D) et (D')

Deux forces *égales* et *parallèles* d'intensité F étant appliquées, la tige *OO'* se tord mais son axe reste *vertical*; le disque reste *horizontal* et tourne d'un angle $\widehat{AOB} = \alpha$. Les lignes d'action des forces (directions des fils) sont tangentes à un des cercles ponctués, ce qui permet de mesurer plus facilement le *bras de levier* du couple $(\vec{F}, \vec{F'})$; c'est le diamètre du cercle : $d = HH'$. On peut ainsi connaître le moment $F \times d$ du couple appliqué. Le poids de l'équipage, force *verticale*, présente par rapport à l'axe OO' un moment *nul*.

Voici quelques résultats obtenus avec une tige de torsion en acier (rayon pour roue de bicyclette) :

FORCES (gf)	BRAS DE LEVIER (cm)	MOMENT (cm.gf)	ANGLE DE TORSION (°)
80	5	400	10
110	8	880	26
105	10	1 050	30
115	12	1 380	40
95	20	1 900	53
110	22	2 420	68
130	23	2 990	80

Le graphique de la figure 17 traduit les mesures. Il montre que :

l'angle de torsion est proportionnel au couple déformant. Réciproquement, le fil tordu imprime à son extrémité un couple de rappel (1) ***proportionnel à l'angle de torsion.***

(1) Ainsi nommé parce qu'il tend à ramener le fil à sa forme primitive.

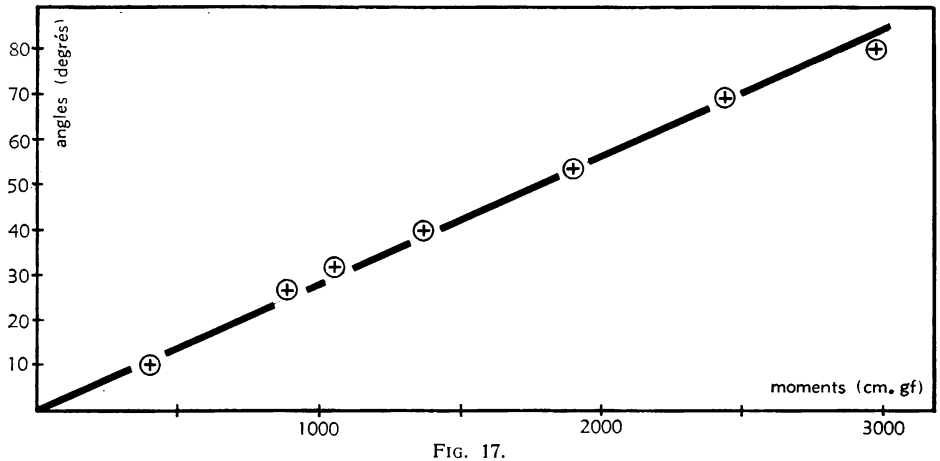


FIG. 17.

Il faut évidemment rapprocher ce résultat de la déformation d'un ressort sous l'effet de la force qui lui est appliquée. Les deux phénomènes sont très comparables, car ils suivent une loi de même forme :

Allongement d'un ressort proportionnel à la *force* appliquée.
Angle de torsion d'un fil proportionnel au *couple* appliqué.

Le graphique établi expérimentalement est donc, en fait, un *étalonnage du fil de torsion* comme le graphique de la figure 7, page 21 était un étalonnage du ressort. Un fil de torsion étalonné peut alors, à condition de ne pas changer sa longueur, être utilisé pour appliquer à des solides des couples de moments connus.

EXERCICES

1. Parmi les objets, véhicules et outils suivants, quels sont ceux dont l'emploi nécessite un couple : vrille, scie, volant d'automobile, rabot, robinet, villebrequin, moulin à café, rame, porte qu'on ouvre, traîneau, voiture hippomobile?

2. Un tournevis dont la lame a 6 mm de large exerce sur une vis deux forces égales à 2 kgf normales au plan de la lame. Quel est en cm × dyne le couple fourni?

Rép. : 1 177 200 cm × dyne.

3. Les deux extrémités A et B du manche d'un tire-bouchon sont soumises à deux forces F égales, parallèles, de sens contraires, faisant un angle de 45° avec la direction AB. Sachant que AB = 10 cm, déterminer F, pour que le couple exercé soit 20 m.N.

4. Une lame de scie circulaire, de rayon 20 cm, est entraînée par un moteur qui lui communique un couple C = 8 m.kgf. Quelle est la force, supposée tangente à la circonférence des dents de scie, qui représente la somme des résistances offertes à la pénétration de la lame dans le bois?

5. Le plan formé par le coude ABCD d'un vilebrequin étant horizontal, un ouvrier doit exercer une force verticale d'intensité F pour faire pénétrer le foret dans une planche.

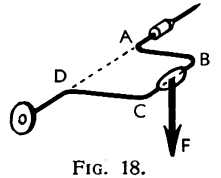


FIG. 18.

a) Quel est le moment de cette force par rapport à l'axe AD? On donne : F = 2 kgf; AB = 10 cm. On demande d'exprimer le moment successivement avec les unités de différents types.

b) Quelle doit être la nouvelle intensité F_1 de la force verticale, pour que son moment reste le même quand le foret a tourné de 20°?

c) Le foret a un diamètre de 6 mm. Quelle force tangentielle faudrait-il appliquer à sa section circulaire pour obtenir le même effet qu'avec le vilebrequin?

PROBLÈMES

1. Un fil rectiligne à l'extrémité duquel on applique un couple de torsion $\overset{\curvearrowright}{C}$ se tord d'un angle α (*radians*) tel que :

$$C = K.\alpha.$$

K est nommé : *constante de torsion du fil.*

1° Énumérer les unités qui peuvent servir à exprimer une constante de torsion.

2° Calculer, en utilisant les résultats numériques de l'expérience décrite par la figure 16 p. 50 une valeur approximative de la constante de torsion de la tige utilisée.

3° La constante de torsion est reliée au diamètre d, à la longueur l d'un fil et à la nature du métal qui le constitue par l'expression

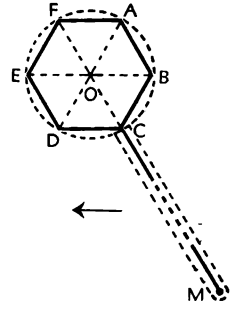
$$K = \mu\frac{d^4}{l}.$$

Pour l'acier le coefficient μ vaut 800 environ quand on exprime les forces en kilogrammes-forces et les longueurs en millimètres. Calculer le couple qui peut tordre de 1 radian un fil d'acier de longueur 1 m et de diamètre 1 mm.

4° Quelle serait en minutes l'angle de torsion d'une tige d'acier de même longueur, de diamètre 5 cm, soumise au même couple?

2. Un écrou à 6 pans *ABCDEF* dont les côtés sont ceux d'un hexagone régulier inscrit dans un cercle de 2 cm de diamètre peut tourner autour d'un axe O horizontal. Les côtés FA et DC sont *toujours initialement horizontaux*. Pour une rotation dans le sens de la flèche il faut appliquer le long de deux côtés opposés, perpendiculairement à l'axe, deux forces égales, chacune ayant une intensité de 5 kgf.

1° Dessiner ces forces. *Échelle* : 1 kgf représenté par 1 cm.



2° Quelle force unique, verticale, appliquée en B pourrait faire tourner l'écrou?

3° A l'aide d'une clef de serrage, emboîtée sur l'écrou, dont le manche peut être représenté par la demi-droite OCM on applique en M une force horizontale $\vec{F}$ dans le plan de figure. La longueur OM est de 20 cm. Quelle est l'intensité de la force quand elle provoque la rotation? (poids de la clef négligeable).

4° Montrer que, pendant que l'écrou tourne de 120° à partir de sa position initiale en offrant toujours la même résistance, l'intensité de la force $\vec{F}$, supposée toujours horizontale passe par un minimum. Calculer cette valeur.

5° Pour la rotation précédente, tracer le graphique des variations de F en fonction de l'angle de rotation α. (On donnera à α une dizaine de valeurs et on construira la courbe par points, en s'aidant d'une table de lignes trigonométriques naturelles).

Pour quel angle l'intensité de la force est-elle 4 fois plus grande que celle du minimum rencontré. (Utiliser le graphique pour une détermination *approchée*)?

Photo Alinari

FIG. 1. — ***La tour penchée de Pise.*** *Un affaissement de terrain a provoqué l'inclinaison de l'édifice. La répartition des matériaux est cependant telle que la verticale passant par le centre de gravité tombe encore à l'intérieur de la base de sustentation.*

5. VERTICALE. CENTRE DE GRAVITÉ. ÉQUILIBRES

A. VERTICALE

1. DÉFINITION. — Un *fil à plomb* est constitué par un objet lourd, souvent un cylindre de métal terminé par une pointe conique, suspendu à un point par un fil souple. Abandonné à lui-même, après quelques oscillations ce corps pesant s'immobilise dans une certaine position, toujours la même (fig. 2).

La verticale du point de suspension est, par définition, la direction du fil à plomb immobile.

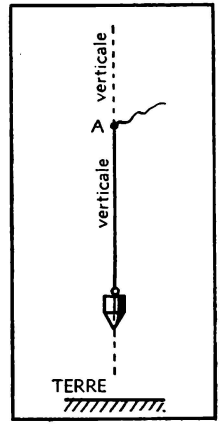


FIG. 2. — *La direction du fil à plomb définit la* ***verticale*** *du point de suspension.*

2. PROPRIÉTÉS DES VERTICALES. — En chaque point de suspension passe donc une verticale et une seule. Les verticales possèdent des caractères importants :

1. La verticale ne dépend pas du corps suspendu. — Il est assez facile de le vérifier, après avoir repéré géométriquement la verticale d'un point, en substituant à l'objet qui leste le fil à plomb un autre objet.

2. Les verticales et le centre de la Terre. — Toutes les verticales, prolongées, passent au voisinage du centre de la Terre. Elles passeraient même exactement au centre si la Terre était absolument sphérique, homogène et immobile; or la Terre ne présente aucune de ces qualités. Cependant on peut considérer sans grave erreur que toutes les verticales sont concourantes en C (fig. 3) ce qui permet de calculer avec une bonne précision l'angle de deux verticales quand on connaît les situations géographiques des deux points où on les considère.

Évaluons, à titre d'exemple, l'angle que font les verticales de deux points situés à peu près sur un même méridien l'un à Paris, l'autre à Bourges (Distance Paris-Bourges : environ 200 km). Le tour de la Terre, le long d'un grand cercle méridien, mesure environ 40 000 kilomètres et correspond à un angle de 360°. L'angle α cherché est donc :

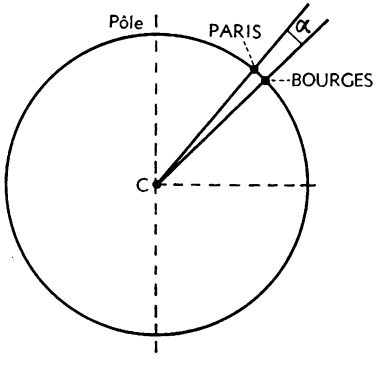


FIG. 3. — *Angle de deux verticales.*

$$\alpha = \frac{360 \times 200}{40\,000} \simeq 1°,8.$$

Entre deux verticales passant par deux points d'une même ville (distance inférieure à 10 km) on trouverait par le calcul un angle 20 fois plus faible, soit environ, en minutes :

$$\beta = \frac{1,8 \times 60}{20} \simeq 5,4 \text{ minutes.}$$

S'il s'agit de deux points d'une même salle (distance inférieure à 10 mètres) :

$$\gamma \simeq \frac{5,4 \times 60}{1\,000} \simeq 0,32 \text{ secondes.}$$

Comme les meilleurs instruments ne parviennent pas à mesurer des angles avec des erreurs inférieures à quelques secondes d'arc, on peut donc dire *qu'en un même lieu les verticales sont parallèles.*

3. Définition des horizontales. Plan horizontal. — Rappelons une indication déjà donnée au chapitre 2. Contre la verticale fournie par un fil à plomb, plaçons le bord *AB* d'une équerre (fig. 4). L'autre bord *AC* donne, par définition, la direction d'une horizontale passant par *A*. Par ce point il passe d'ailleurs une infinité d'horizontales, que l'on obtient en faisant tourner l'équerre autour du fil, *A* étant fixe et *AB* restant en contact avec le fil. L'ensemble de toutes ces horizontales forme le plan horizontal passant par *A*. *La verticale passant par un point donné et une horizontale quelconque passant par ce point sont donc perpendiculaires.*

4. Verticale et chute libre (fig. 5). — Suspendons par un fil, en *A*, une fléchette alourdie terminée par une pointe [***a***] et repérons sur une table, le point *B* où passe la verticale de *A*. Soulevons alors la fléchette en tirant sur le fil, puis, quand elle est bien immobile, brûlons le fil de façon à déclencher la chute sans imprimer au corps qui tombe la moindre impulsion [***b***]. La pointe de la fléchette vient exactement se planter au point *B* [***c***]. *En chute libre un corps suit la verticale.*

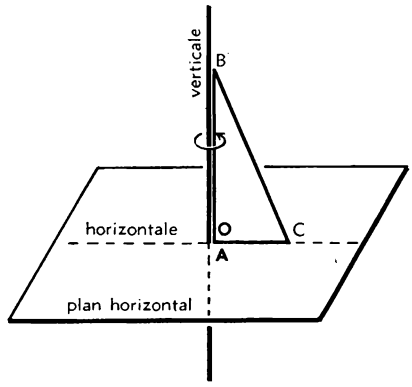


FIG. 4. — *Définition du plan horizontal.*

Or jusqu'ici nous avons toujours observé qu'un corps, libre de se mouvoir et soumis à une seule force ou à des forces constantes parallèles et de même sens, prend un déplacement rectiligne de même direction que la ou les forces appliquées. La définition donnée à la page 26 nous paraît maintenant justifiée : *la verticale d'un point est la direction du poids d'un très petit objet situé en ce point.*

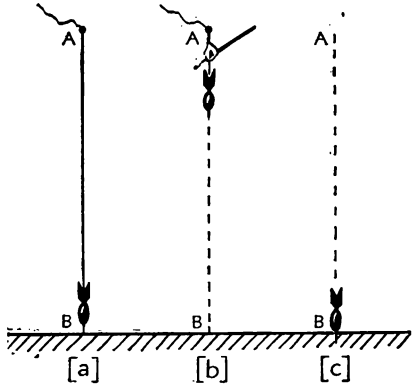


FIG. 5.

B. CENTRE DE GRAVITÉ

Les notions étudiées dans les pages qui suivent (CENTRE DE GRAVITÉ) *sont ordonnées de manière à servir de guide au cours d'une séance de Travaux Pratiques dans le cadre d'une Classe-laboratoire. On y fait largement appel à l'expérience et à l'intuition.*

3. EXISTENCE. — Chaque parcelle de matière constituant un corps solide possède un *poids*. Tous ces poids partiels sont autant de forces parallèles et de même sens appliquées au même corps. Leur résultante qui est le poids total possède donc un point d'application bien déterminé.

Définition : *On appelle centre de gravité le point d'application du poids d'un corps.*

Les expériences suivantes montrent l'importance pratique de ce point.

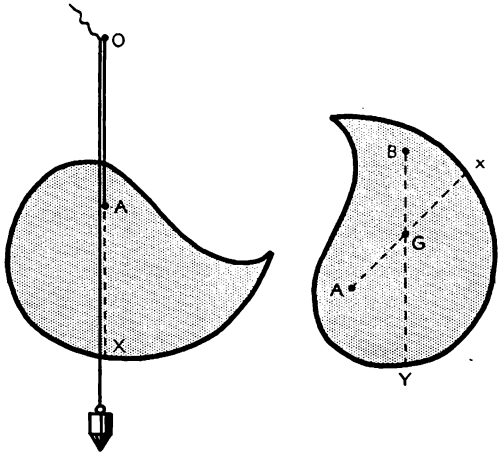


FIG 6. — *Recherche expérimentale du centre de gravité.*

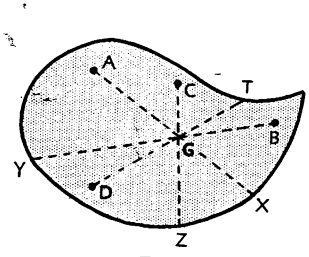


FIG. 7.

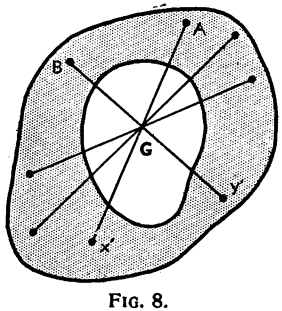


FIG. 8.

4. RECHERCHE EXPÉRIMENTALE. — Soit une plaque mince, de contour quelconque. Suspendons-la librement, par un point quelconque A d'un fil, lui-même accroché au support O (fig. 6). Dès que la plaque est immobile elle se trouve en équilibre sous l'action de deux forces :

son poids
la tension du fil.

Ces deux forces sont égales et opposées (chap. 3, § 2). Comme la tension du fil se fait suivant OA, cette direction est aussi la direction du vecteur représentant le poids; *elle contient donc le centre de gravité.*

Traçons sur la plaque la direction de OA. Il est commode pour cela d'accrocher au même point support O un fil à plomb assez long. Ce fil touche le fil OA sur toute sa longueur et permet d'en repérer le prolongement AX. En recommençant ce tracé pour un autre point de suspension B nous obtenons BY. AX et BY se coupent en un point $\boldsymbol{G}$ qui est le centre de gravité cherché.

a) *LE CENTRE DE GRAVITÉ EST UNIQUE* (fig. 7). — Sur la même plaque, d'autres points de suspensions fournissent, de la même manière, d'autres droites telles que CZ, DT etc.... Le faisceau de ces droites est concourant en G. *Le centre de gravité est donc unique.*

b) *LE CENTRE DE GRAVITÉ PEUT SE TROUVER EN DEHORS DU SOLIDE* (fig. 8). — Prenons une plaque qui présente, au centre un large *évidement*, et, après en avoir repéré la direction, matérialisons quelques-unes des droites précédentes à l'aide de fils tendus : AX', BY', etc.... — Nous constatons que les fils se croisent en un point unique G, situé en *dehors de la matière* qui constitue le solide étudié. Ce procédé de recherche pourrait être appliqué, avec de plus grandes difficultés, à des corps non plats, volumi-

neux et de formes compliquées : couronne, cerceau, flacon, chaise, aimant en U, table, panier à salade..., etc.

c) *POUR DES CORPS HOMOGÈNES, DE MÊME FORME, LE CENTRE DE GRAVITÉ OCCUPE LA MÊME POSITION.* — Découpons quelques plaques planes, d'épaisseur uniforme, de mêmes contours, dans quelques substances homogènes : carton, bois, aluminium..., et cherchons pour chaque plaque son centre de gravité. Tous les centres de gravité occupent des positions identiques par rapport aux contours identiques de toutes les plaques.

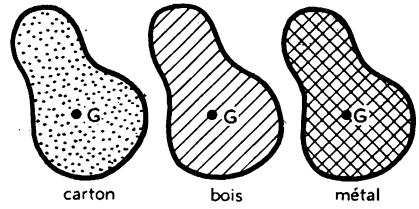


FIG. 9. — *Centres de gravité de solides homogènes de même forme.*

5. CAS DES SOLIDES HOMOGÈNES DE FORMES SIMPLES. — La méthode de recherche expérimentale est toujours valable, mais ici le raisonnement peut donner des indications parfois très précises sur la position du centre de gravité. On tient compte des **éléments de symétrie** du solide.

a) *EXEMPLE DE RAISONNEMENT.* — Soit une tige AA' rectiligne, homogène, de section transversale assez petite par rapport à la longueur pour que nous puissions assimiler ce solide à une *droite pesante* (fig. 10). Isolons par la pensée deux très petits éléments de volume identiques, réduits pratiquement aux deux points A et A'.

Leurs deux poids $\vec{p}_1$ et $\vec{p}'_1$ sont égaux. La résultante de ces deux forces parallèles et de même sens est $\vec{P}_1$. Elle est appliquée en C, milieu du segment AA' et son intensité est $P_1 = p_1 + p'_1$. Deux autres éléments de volume identiques, occupant deux positions B et B' symétriques par rapport à C, sont soumis à deux poids égaux $\vec{p}_2$ et $\vec{p}'_2$ dont la résultante, d'intensité $P_2 = p_2 + p'_2$ est également appliquée en C. De proche en proche on peut ainsi composer toutes les forces élémentaires de pesanteur, exercées sur toute la matière constituant la barre. La conclusion est évidente : ***le centre de gravité d'une barre homogène rectiligne est situé en son milieu.***

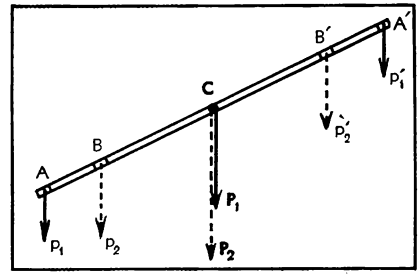


FIG. 10. — *Centre de gravité d'un segment de « droite pesante ».*

Avec ce point de départ on peut étendre le raisonnement à bien d'autres cas. On obtient les résultats suivants que l'expérience vérifie aisément toutes les fois qu'elle est possible.

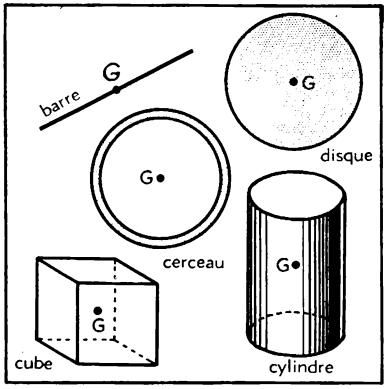


FIG. 11.

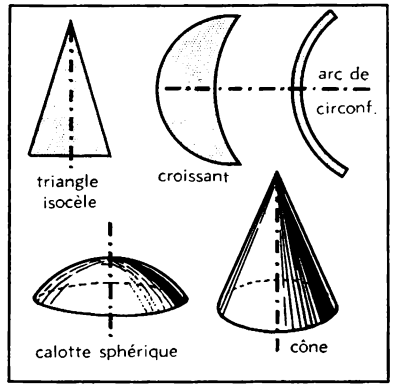


FIG. 12.

b) *LE SOLIDE PRÉSENTE UN CENTRE DE SYMÉTRIE* (fig. 11). — Le centre de gravité est confondu avec le centre de symétrie. *Exemples :* milieu d'un fil rectiligne (cas précédent), centre d'un cerceau, d'un disque, d'un carré, d'un rectangle, d'un cube, d'une sphère, d'un cylindre,...

c) *LE SOLIDE PRÉSENTE UN AXE DE SYMÉTRIE* (fig. 12). — Le centre de gravité se trouve sur cet axe. *Exemples :* arc de circonférence, croissant, secteur circulaire, calotte sphérique....

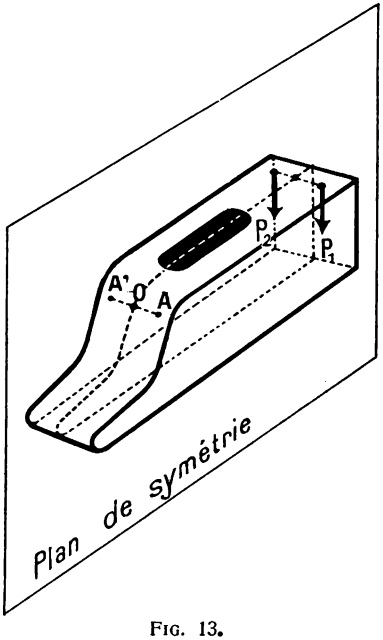


FIG. 13.

d) *LE SOLIDE PRÉSENTE UN PLAN DE SYMÉTRIE* (fig. 13). — Le centre de gravité se trouve dans ce plan. *Ex.* : fourchette, tête de marteau, aimant en U (généralement 2 plans de symétrie).

Il est évident que si un solide possède plusieurs éléments de symétrie (axes, plans), le centre de gravité se trouve à l'intersection commune de ces éléments.

6. CAS DE PLUSIEURS SOLIDES RIGIDEMENT LIÉS.

Expérience (fig. 14). — Soient deux plaques de carton [1] et [2] dont les poids sont connus : P_1 et P_2. Déterminons leurs centres de gravité : G_1 et G_2. Ensuite réunissons les deux plaques en une seule à l'aide d'une liaison rigide (colle ou agrafes) et cherchons où se trouve le centre de gravité de l'ensemble des solides [1] [2]. Soit G ce point. Il est facile de constater que :

a) G se trouve sur le segment G_1G_2 et *entre* G_1 et G_2;

b) $P_1 \times G_1G = P_2 \times G_2G$. Ce résultat ne nous surprend pas. Il vérifie simplement que le centre de gravité est le point d'application de la résultante des deux poids $\vec{P_1}$ et $\vec{P_2}$, forces parallèles composantes du poids total $\vec{P}$. Le résultat s'étend à d'autres cas très nombreux :

Soit une bouteille A bouchée par le bouchon B (fig. 15). L'ensemble, soumis aux forces de la pesanteur, se comporte comme un objet unique, indéformable mais non homogène.

Pour déterminer son centre de gravité, il suffira de composer P_A (poids de la bouteille, appliqué en son centre de gravité G_A) et P_B (poids du bouchon, appliqué en son centre de gravité G). Si on connaît P_A et P_B, et si la recherche expérimentale ou le raisonnement ont déterminé G_A et G_B, le calcul fournira la position de G, par la relation :

$$P_A \times a = P_B \times b.$$

La méthode se généralise facilement à des cas plus compliqués.

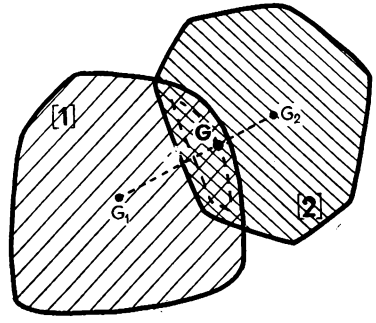


FIG. 14. — *Centre de gravité de deux solides liés.*

C. ÉQUILIBRES

7. PRINCIPE DE L'ACTION ET DE LA RÉACTION. — Un corps n'est jamais isolé dans la nature. Il subit des *forces* produites par les corps qui l'environnent et, en revanche, exerce sur eux des *forces*. Souvent il est en contact avec les autres corps : exemples : dynamomètre accroché au mur, canne suspendue à un porte-manteau, verre reposant sur une table, roue de bicyclette maintenue par son moyeu sur la fourche.... L'étude des conditions d'immobilité ou d'*équilibre* des ensembles de corps et supports constitue la branche de la mécanique appelée la **Statique.**

Nous avons déjà observé (Leçon 3 § 2) que deux forces égales et opposées réalisent précisément un équilibre. Partant de cas particuliers et généralisant jusqu'aux exemples les plus complexes, on peut admettre que la Statique

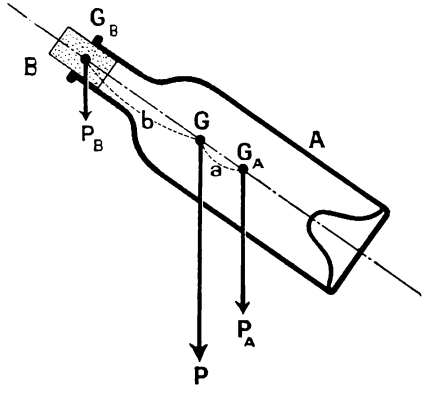


FIG. 15.

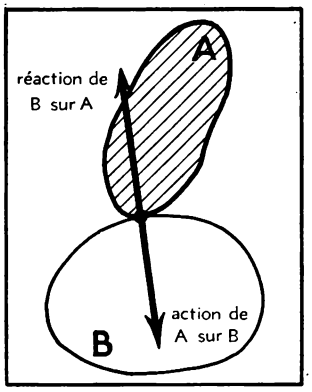


FIG. 16. — ***Actions et Réactions** sont **égales et opposées.***

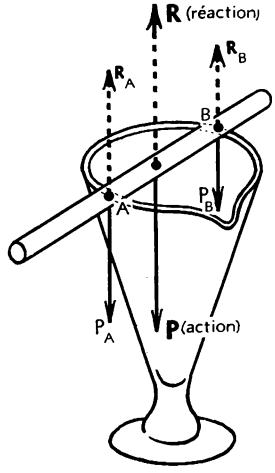


FIG. 17. — *Il y a autant de réactions partielles que de points de contact.*

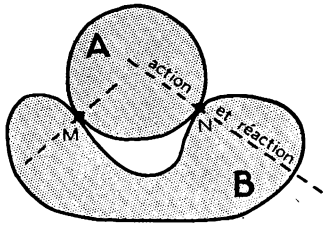


FIG. 18.

tout entière repose sur le principe suivant (fig. 16). :

PRINCIPE : **Tout corps A exerçant sur un autre corps B une force dite *action*, subit de la part de B une force dite *réaction*. Action et réaction sont égales et opposées.**

REMARQUES SUR LES RÉACTIONS DANS LE CAS DES CONTACTS.

1. Il est utile d'avoir une représentation matérielle du point d'application commun de l'action et de la réaction : C'est le *point de contact*, commun aux deux corps.

2. S'il existe plusieurs points de contact, il y a *autant de réactions que de points de contact.* Ainsi un agitateur cylindrique reposant sur un verre à bord arrondi (fig. 17), son poids $\vec{P}$ se décompose en deux *actions* $\vec{P}_A$ et $\vec{P}_B$ exercées sur le verre aux deux points de contact *A* et *B*. Le verre réagit par deux *réactions* $\vec{R}_A$ et $\vec{R}_B$ dont la résultante $\vec{R}$ est égale et opposée à $\vec{P}$. En chacun des points de contact le principe de l'action et de la réaction est respecté.

3. Quand les deux corps au contact sont parfaitement polis (*absence de tout frottement*) la direction commune de l'action et de la réaction opposée est la *perpendiculaire commune aux deux surfaces en contact* (fig. 18).

4. *La réaction s'ajuste sur l'action.* Quand l'action est déterminée, la réaction prend une valeur égale, opposée si l'équilibre est réalisé. Si la solidité des supports ne le permet pas, ils sont brisés et un nouvel état d'équilibre apparaît, où le corps qui exerce l'action prend appui sur d'autres supports. Ainsi quand on

suspend à un clou un objet très lourd le clou peut être arraché et l'objet, tombant sur le sol, trouve de nouvelles conditions de repos.

8. ÉQUILIBRE DES CORPS PESANTS. — Les trois genres d'équilibres. — Nous étudierons les cas où le corps pesant est en contact avec son support en un point (ex. : lustre accroché au plafond), en plusieurs points (ex. : chaise reposant sur le plancher), et le cas particulièrement important où le contact a lieu en deux points (ex. : roue de bicyclette maintenue par les deux points d'appui de son axe de rotation).

Donnons tout d'abord quelques définitions.

Définitions :

1° On dit que l'équilibre est ***stable*** quand le corps, légèrement écarté de sa position d'équilibre, *tend à y revenir.*

2° On dit que l'équilibre est ***instable*** quand le corps, légèrement écarté de sa position d'équilibre, tend à *s'en écarter davantage.*

3° On dit que l'équilibre est ***indifférent*** quand le corps, légèrement écarté de sa position d'équilibre, *reste dans la nouvelle position.*

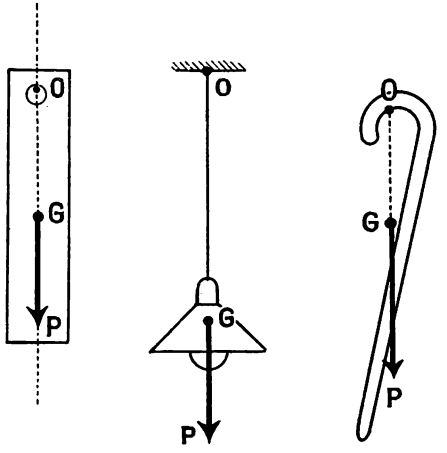


FIG. 19. — *Équilibres stables.*

L'expérience montre qu'un corps pesant, abandonné aux forces qui le sollicitent, tend à toujours venir dans une position d'équilibre stable. Cette règle détermine son mouvement. Si ce mouvement se trouve contrarié par des forces autres que la pesanteur (forces de liaison), le corps se déplace jusqu'à acquérir la position (compte tenu des liaisons) pour laquelle ***son centre de gravité est le plus bas possible.***

9. CORPS SUSPENDU PAR UN POINT.

a) **Le centre de gravité est au-dessous de O** (fig. 19). — L'immobilité étant réalisée, si on écarte légèrement la règle hors de sa position d'équilibre, elle tend à y revenir. On est en présence d'un équilibre **stable.**

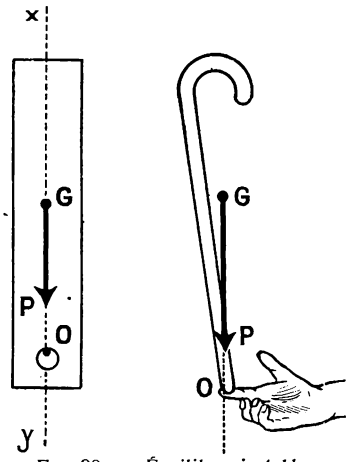


FIG. 20. — *Équilibres instables.*

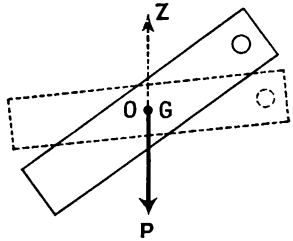


FIG. 21. — *Équilibre indifférent.*

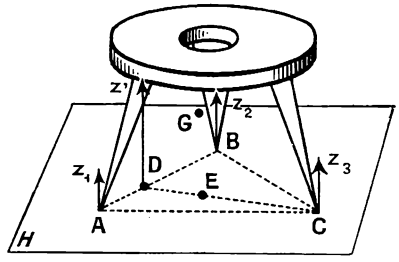


FIG. 22.

C'est le cas d'une canne suspendue, d'un lustre accroché au plafond, d'une araignée au bout de son fil, etc.

b) **Le centre de gravité est au-dessus de O** (fig. 20). — Cet équilibre est très difficile à réaliser. Si l'on y parvient, la règle, légèrement écartée de sa position d'équilibre, tend à s'en éloigner davantage. L'équilibre est **instable.**

Une canne maintenue sur un doigt ne peut rester dans cette position que si l'opérateur réussit à placer le point O toujours sur la verticale issue de G, lui-même constamment mobile [1].

c) **Le centre de gravité est confondu avec O** (fig. 21). — Dans ce cas, l'Action et la Réaction ayant toujours un point commun O, la réaction Z du support pourra toujours être opposée au poids P quelle que soit la position du solide.

Si le corps est légèrement écarté de sa position d'équilibre, il reste dans la nouvelle position; l'équilibre est **indifférent.**

10. CORPS REPOSANT EN PLUSIEURS POINTS SUR UN PLAN HORIZONTAL. — Considérons un tabouret à trois pieds reposant en trois points ABC sur un plan horizontal H parfaitement poli (fig. 22). En ces points les réactions Z_1 Z_2 Z_3 sont verticales, dirigées vers le haut. En composant Z_1 et Z_2, puis leur résultante Z' avec Z_3 on voit que le point d'application E de la résultante générale de Z_1 Z_2 Z_3 est à l'*intérieur* du triangle ABC.

Or, l'équilibre sera réalisé si le poids du tabouret est égal et opposé à la résultante des trois réactions; il faut donc pour cela que la verticale passant par le centre de gravité « perce » le plan H à *l'intérieur* du triangle ABC, appelé *triangle de sustentation.*

On généralise immédiatement au cas où il y a plus de 3 points de contact :

Pour qu'un solide reposant sur un plan horizontal soit en équilibre, il faut que la verticale abaissée de son centre de gravité tombe à l'intérieur du polygone (ou base) de sustentation.

(1) On peut s'étonner qu'un cerceau qui roule, qu'une toupie qui tourne... ne tombent pas, bien que leur centre de gravité soit manifestement au-dessus du point de contact avec le support; c'est qu'il s'agit là non de corps au repos, mais en mouvement, domaine que nous n'étudions pas.

Autres exemples. — Un cylindre homogène C d'axe vertical (fig. 23) restera en équilibre sur un plan horizontal quelle que soit sa hauteur, car la verticale passant par le centre de gravité reste toujours confondue avec l'axe du cylindre.

Un cylindre C′, d'axe oblique, pourra rester en équilibre; mais un cylindre C″ de hauteur trop grande bascule, le point A tombant en dehors de la base de sustentation.

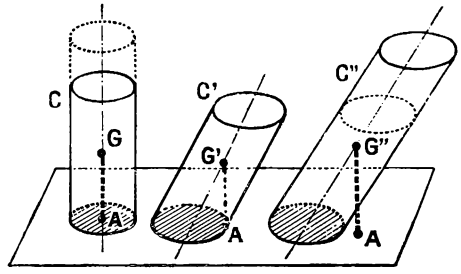


FIG. 23.

La base de sustentation d'un homme debout est limitée par le bord extérieur de l'empreinte des pieds (fig. 24). Un boxeur qui s'attend à recevoir un coup capable de déplacer dangereusement son centre de gravité a les réflexes suivants:

a) *écarter les pieds;* la base de sustentation est agrandie;

b) *se baisser;* le centre de gravité est abaissé. La verticale issue de ce point a ainsi plus de chances de ne pas tomber en dehors des limites permises (contour ABCDEFA).

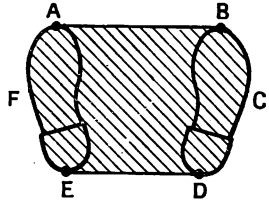


FIG. 24.

11. CORPS MOBILE AUTOUR D'UN AXE FIXE.

a) *EXPÉRIENCE PARTICULIÈRE* (fig. 25). — Soit une plaque plane, mobile avec un frottement négligeable autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité (roulement à billes). Proposons-nous d'étudier son équilibre quand nous lui appliquons différentes forces (poids, forces de traction d'un fil relié à un dynamomètre, couple créé par un fil de torsion...). Restons cependant dans le cas particulier où *toutes les forces appliquées* $\vec{F}$ *sont orthogonales à l'axe de rotation et ou les couples ont des vecteurs* $\overset{\curvearrowright}{C}$ *parallèles à cet axe.*

Notons que le poids de la plaque n'intervient pas dans l'équilibre, car, passant par l'axe, il est égal et opposé à une réaction du support. On sait d'ailleurs que si le poids était seul appliqué, le solide resterait ici en équilibre.

Pour un équilibre donné mesurons les forces et leurs bras de leviers, ainsi que l'angle de torsion du fil, qui donne avec son graphique

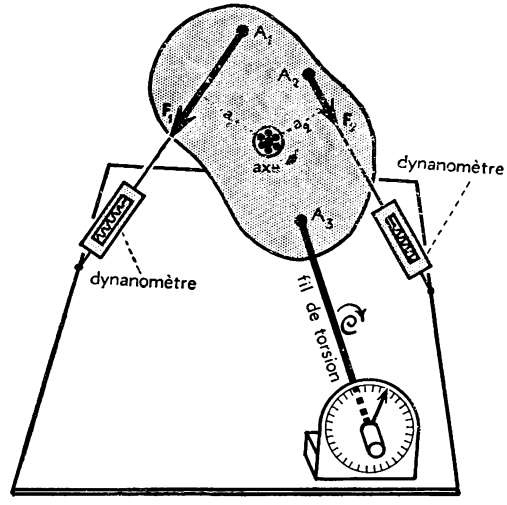


FIG 25. — *Recherche de l'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe.*

d'étalonnage la valeur du couple appliqué. — Affectons, par exemple, du signe + les moments qui tendent à faire tourner le solide, autour de son axe, dans le sens des aiguilles d'une montre (↷), et du signe — les moments qui tendent à le faire tourner en sens inverse (↶). Avec le montage réalisé sur la figure 25, le bilan s'établit à quelques % près :

$$-\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 + \mathcal{C} = 0.$$

$-\mathcal{M}_1$: moment de la force F_1 ; $\mathcal{M}_2$: moment de la force F_2 ; $\mathcal{C}$: moment du couple

Ceci exprime que la somme *algébrique* des moments appliqués est nulle. Ce résultat se généralise et conduit à un théorème important qu'on démontre en Mécanique et que nous admettons sous un énoncé simplifié :

b) *THÉORÈME DES MOMENTS.* — ***La condition nécessaire et suffisante pour qu'un corps mobile autour d'un axe soit en équilibre est que la somme des moments qui tendent à le faire tourner dans un sens soit égale à la somme des moments qui tendent à le faire tourner en sens inverse.***

Remarques :

1. Si l'axe de rotation ne passe pas par le centre de gravité, le poids intervient naturellement dans l'équilibre par son moment, affecté du signe convenable.

2. L'application du couple, dû à la torsion du fil, peut se faire en *n'importe quel point de la plaque.* L'expérience vérifie ainsi qu'un couple donné, de moment déterminé, s'exerce avec la même intensité par rapport à n'importe quel axe perpendiculaire à son plan (Leçon 4 § 3).

3. Montrons sur un cas particulier comment le théorème des moments peut être considéré comme une application du *Principe d'action et réaction.*

Soit *M un corps* mobile autour d'un axe O perpendiculaire au plan de figure et deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$, situées dans ce plan, qui réalisent l'équilibre. *A* et *B* sont leurs points d'application. $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ sont supposées concourantes en *S*. Faisant glisser les deux forces sur leurs lignes d'action amenons-les en SF_1' et SF_2' et, par application de la règle du parallélogramme, traçons la résultante *SR*. — Pour le solide *M* il y aura équilibre, si à l'action $\vec{R}$ qu'il exerce sur l'axe, cet axe peut opposer une réaction égale. A l'équilibre, *SR* prolongé passe donc par *O*. Abaissons de *R* et *O* les perpendiculaires RH_1' et OH_1 à la droite *SA*, et les perpendiculaires RH_2' et OH_2 à la droite *SB*. RH_1' et RH_2' sont les hauteurs des triangles $SF_1'R$ et $SF_2'R$ dont chacun est la moitié du parallélogramme $SF_1'RF_2'$; l'égalité des surfaces de ces triangles se traduit par :

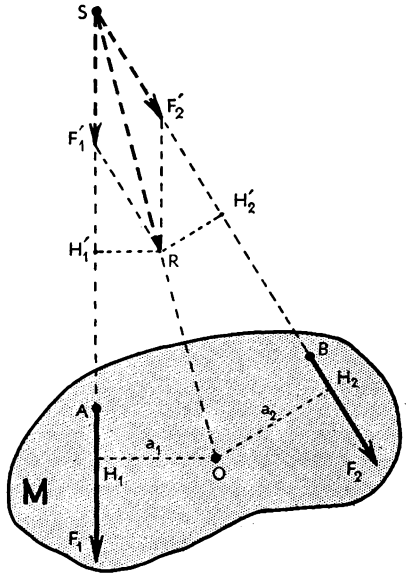


FIG 26.

$$1/2(SF_1' \times H_1'R) = 1/2(SF_2' \times H_2'R)$$

soit :
$$\frac{SF_1'}{SF_2'} = \frac{RH_2'}{RH_1'}. \qquad [1]$$

Mais, d'après la similitude des triangles SRH_1' et SOH_1, SRH_2' et SOH_2 :

$$\frac{RH'_2}{OH_2} = \frac{SR}{SO} = \frac{RH'_1}{OH_1}.$$

Ou encore :

$$\frac{RH'_2}{RH'_1} = \frac{OH_2}{OH_1}.$$

En revenant à la relation [1] :

$$\frac{SF'_1}{SF'_2} = \frac{OH_2}{OH_1}, \qquad [2]$$

Comme : $SF'_1 = F_1$, $SF'_2 = F_2$, $OH_1 = a_1$ (bras de levier de F_1), $OH_2 = a_2$ (bras de levier de F_2), on déduit de [2] :

$$\underbrace{F_1 . a_1}_{\text{moment de la force } \vec{F}_1} = \underbrace{F_2 . a_2}_{\text{moment de la force } \vec{F}_2}.$$

C'est l'expression simplifiée du théorème des moments.

En Physique les rotations autour d'axes fixes sont très fréquentes; aussi ce théorème, qui, répétons-le, n'est qu'un aspect particulier du Principe d'Action et Réaction, prend-il une importance considérable.

EXERCICES

1. Citer des solides présentant un axe de symétrie.

2. Quels sont parmi les objets suivants ceux qui possèdent un axe de symétrie? Bouteille, encrier, crayon, fourchette, vitre (carrée, rectangulaire), clef, triangle (scalène, isocèle), cercle, pointe, vis.

3. Citer des solides possédant : un plan de symétrie; deux et plus de deux plans de symétrie; un axe et un plan de symétrie.

4. Citer des solides présentant un centre de symétrie.

5. Quels sont parmi les corps suivants ceux qui possèdent un centre de symétrie? Bouchon cylindrique, cylindre à axe oblique, anneau de rideau, ballon ovale, crayon non taillé, crayon taillé, roue de bicyclette complète, bille de billard, pyramide, cône, cube, hexagone régulier.

6. Deux règles homogènes de même longueur : AC = AB = 20 cm sont fixées rigidement à angle droit (fig. 27). AC pèse 2 fois plus que AB.

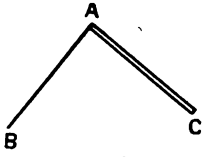


FIG. 27.

Déterminer la position du centre de gravité de ce solide.

Rép. : au $\frac{1}{3}$ de la distance des milieux de AC et AB, du côté de AC.

7. Un mètre pliant à 5 branches forme une figure carrée ABCD (fig. 28). Position du centre de gravité par rapport au centre O du carré?

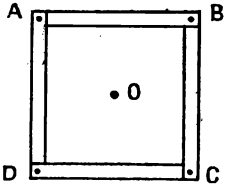


FIG. 28.

Distance OG? Rép. : OG = 2 cm.

8. Montrer que le centre de gravité d'une plaque plane triangulaire homogène est au point de concours des médianes.

9. Une plaque carrée homogène ABCD de côté 30 cm (fig. 29) est découpée suivant EFHK. AE = EK = 10 cm, EF = 15 cm. On enlève la partie hachurée.

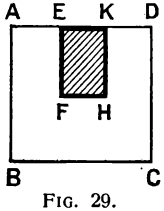


FIG. 29.

Position, par rapport au centre O du carré, du centre de gravité de la figure qui reste?

Rép. : OG = 1,5 cm.

10. Dans un disque plat homogène, de rayon R,

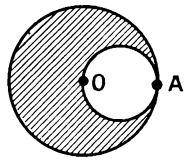


FIG. 30.

pesant 400 gf on découpe un croissant comme l'indique la figure 30.

Position du centre de gravité G du croissant?

Quel poids P faut-il placer en A pour que le centre de gravité du croissant soit ramené en O?

Rép. : $OG = \frac{R}{6}$; P = 50 gf.

11. Une roue de bicyclette pèse 1 kgf; la valve entre dans ce poids pour 10 gf. Le diamètre de la roue, supposée réduite à un cerceau pesant, est 70 cm. Position du centre de gravité de la roue complète par rapport à l'axe O.

Rép. : OG = 0,35 cm.

12. Un cône sur une table peut prendre plusieurs genres d'équilibre différents. Expliquez comment.

13. Une bille, assimilable à un point, est suspendue par un fil à un point fixe. Son poids est 200 gf. Abandonnée sans précautions, elle effectue des oscillations.

Dans quelle position finit-elle par s'arrêter?

Quelle est alors la réaction du support?

On la maintient écartée hors de la position précédente en lui appliquant une force horizontale F; le fil fait alors un angle de 45° avec la verticale.

Calculer F ainsi que la nouvelle réaction du support.

Rép. : fil vertical; R = 200 gf; F = 200 gf; R′ = 282 gf.

14. Une sphère dont le centre de gravité est artificiellement amené en un point G distinct du centre peut se maintenir sur un plan incliné rugueux. Expliquer pourquoi. (On admettra que la réaction d'un plan rugueux est *oblique* à ce plan).

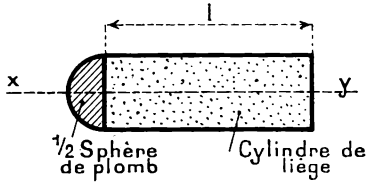


FIG. 31.

15. Soit un solide formé par l'assemblage d'un bouchon cylindrique en liège d'axe *xy* et une demi sphère en plomb de même rayon (fig. 31). Montrer que, suivant la valeur de *l* il pourra :

1° Rester en place.

2° Prendre une position verticale (*xy* vertical).

3° Prendre une position inclinée (*xy* oblique).

Nature de l'équilibre dans ces trois cas.

16. Déterminer la position d'un cube en équilibre instable, une arête étant au contact d'un plan horizontal.

17. Expliquez l'équilibre paradoxal d'un acrobate marchant sur un fil de fer en manœuvrant un balancier

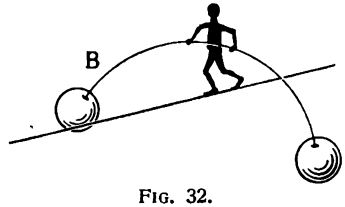


FIG. 32.

B terminé par deux lourdes masses (fig. 32).

18. Une charrette peut se maintenir sur un plan incliné rugueux (fig. 33). Expliquez pourquoi.

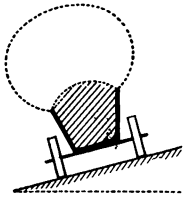


FIG. 33.

Expliquez comment un chargement trop haut risque de la faire verser.

19. Le corps cylindrique d'une casserole de 10 cm de diamètre pèse 200 g. La queue, tige inclinée à 45° sur l'horizontale, de longueur égale au diamètre de la casserole, pèse 320 gf.

La casserole vide peut-elle se maintenir en équilibre, le fond sur une table plane horizontale?

Quel poids minimum d'eau faut-il verser dedans pour réaliser l'équilibre?

Rép. : Non. 26 gf.

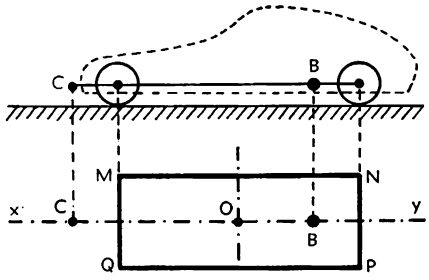
20. Une roue de bicyclette pesant 1 000 gf est en équilibre indifférent autour de son moyeu horizontal. Sur un rayon horizontal OA, en un point C milieu de OA, on exerce un poids de 200 gf. Pour maintenir OA horizontal, on exerce en A une force F faisant un angle de 45° avec OA.

Définir complètement cette force.

Rép. : F = 141 gf

PROBLÈMES

1. Très schématiquement le châssis d'une automobile peut être représenté par un cadre rigide horizontal rectangulaire *MNPQ*, les côtés *MQ* et *NP* figurant les essieux des roues. On pourra admettre que toute la matière constituant la voiture est répartie sur ce cadre, symétriquement par rapport à l'axe *XY*. La batterie d'accumulateurs sera assimilée à un point pesant situé en *B*, sur l'axe *XY*, vers l'arrière, à un mètre du centre *O* du



cadre. On donne $MN = 2{,}80$ *m*. Les roues avant reposant sur le sol on amène les roues arrière sur le tablier d'une bascule qui, alors, indique 400 kgf. Quand ce sont les roues avant qui appuient sur ce tablier les roues arrière reposant sur le sol, la bascule accuse 300 kgf.

1° Quel est le poids de la voiture?

2° Chercher la position du centre de gravité *G* (on calculera la distance *OG*).

3° La batterie est déplacée et amenée à l'avant, au point *B'* symétrique de *B* par rapport à *O*. Calculer le déplacement que subit le centre de gravité. Poids de la batterie : 20 kgf.

4° La batterie étant en *B* on doit effectuer un remorquage et pour cela on doit appliquer au pare-chocs avant, en *C*, à 1,80 m de *O*, une force verticale $\vec{F}$. Calculer cette force.

5° La force $\vec{F}$ toujours verticale dépend-elle de l'angle que fait le plan du cadre avec le sol, supposé horizontal.

2. Un disque homogène *D*, de poids 50 gf, de rayon 12,5 cm, porte une tige rectiligne, homogène, de longueur $AB = 12{,}5$ cm, située dans le prolongement du rayon *OA* et pesant 200 gf (fig. 1).

1° L'appareil repose, en équilibre, sur l'arête horizontale *C* d'un couteau très fin. Précisez les positions possibles pour *C* et indiquer la nature de l'équilibre dans chacun des cas.

2° L'appareil repose sur une table horizontale, en *deux* points, le plan du disque étant vertical. Dessiner sa position et calculer les réactions de la table, supposée parfaitement polie comme le disque, aux deux points de contact.

3° L'appareil peut tourner librement autour d'un axe horizontal, perpendiculaire au disque en son centre *O*. Quelle position prend-il?

4° Au bout d'un fil de poids négligeable enroulé sur la périphérie du disque, on fait alors agir des poids croissants (fig. 2).

a) Pour quel poids le disque prend-il une

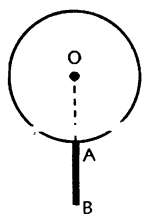


FIG. 1.

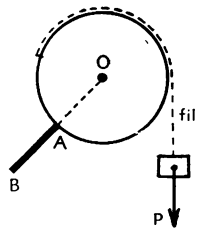


FIG. 2.

position d'immobilité telle que *AB* fait un angle $\theta = 30°$ avec la verticale?

b) Établir une relation générale entre *P* et θ. En donnant à θ quelques valeurs remarquables construire par points la courbe représentant les variations de *P* (ordonnées) en fonction de θ (abscisses). Échelle : 1 cm représente 1 gf; 1 cm représente 10°. Limites du graphique?

5° La force $\vec{P}$ est supprimée. On fait agir sur le disque un couple dont le vecteur représentatif est parallèle à l'axe de rotation et dont le moment est *0,2 m.N*. Utiliser le graphique tracé dans la question précédente pour déterminer l'angle α que fait, à l'équilibre, la tige *OA* avec la verticale.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 8. Centre de gravité.

N° 9. Théorème des moments.

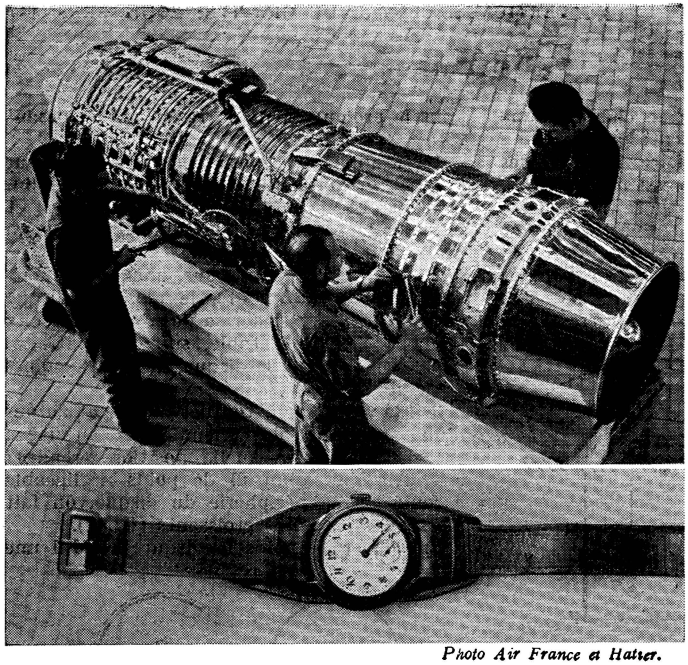


Photo Air France et Hatier.

FIG. 1. — *La vie quotidienne nous offre les moteurs les plus divers. Ce robuste moteur d'avion peut développer une puissance de 1 000 chevaux-vapeur. Le moteur délicat d'une montre fournit une puissance plus d'un milliard de fois plus faible.*

6. TRAVAIL. PUISSANCE

A. TRAVAIL

1. NOTION DE TRAVAIL. — Soit un ouvrier chargé de hisser des briques au sommet d'un mur (fig. 2). Au cours de cette opération le centre de gravité du paquet de briques est soulevé *verticalement* d'une hauteur h dans la direction de la force exercée $\vec{F}$, elle-même *verticale.*

Il suffit que cette force soit à peine supérieure au poids P des briques pour que le déplacement vers le haut se produise. Nous pourrons donc considérer que les intensités de F et de P sont égales. Quand le point d'application de la force s'est déplacé, nous disons que l'ouvrier a effectué un certain ***travail.***

Doublons, triplons... le poids des briques à soulever; nous dirons que, pour un même déplacement h, le *travail est double, triple....* du précédent.

Doublons, triplons... la hauteur h; nous dirons que, pour le même tas de briques, le *travail est double, triple...* du premier envisagé.

De ces exemples se dégage une notion nouvelle, distincte de la notion de force, puisqu'elle fait intervenir le déplacement du point d'application de la force : c'est le **travail.** Cette grandeur peut, en quelque sorte, exprimer ici le bénéfice que l'on retire

à disposer d'un lot de briques à un niveau plus élevé que le sol. *Le travail d'une force constante verticale, dont le point d'application se déplace verticalement, est une grandeur proportionnelle à l'intensité de la force et proportionnelle à la longueur du déplacement.*

Si $\mathcal{T}$ désigne cette grandeur, on devra l'exprimer par :

$$\mathcal{T} = k.P.h$$

k étant un facteur de proportionnalité qui dépend uniquement des unités avec lesquelles on mesure P, h, $\mathcal{T}$. On peut choisir l'unité de travail de façon que, les unités de force et de longueur étant déjà choisies, k soit égal à 1. On écrit alors :

$$\mathcal{T} = P.h.$$

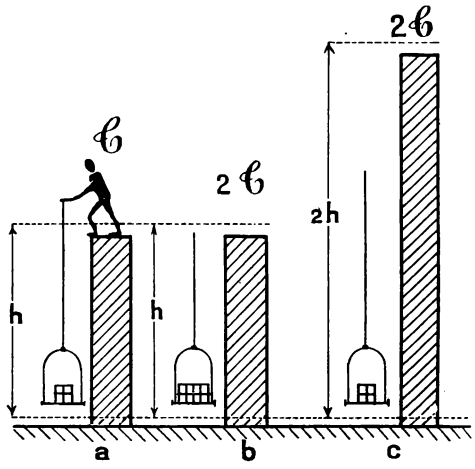


FIG. 2. — *Notion de travail.*

Ce qui signifie :

Le nombre qui mesure le travail est égal au produit du nombre P qui mesure la force verticale par le nombre h qui mesure le déplacement vertical. Plus simplement, cette définition s'énonce :

Le travail d'une force verticale, pour un déplacement vertical de son point d'application est numériquement égal au produit de la force par le déplacement.

Remarque. — Il faut bien distinguer les deux notions suivantes : *travail* (au sens que lui donnent les Physiciens) et *fatigue musculaire.* Si l'ouvrier maintient un paquet de briques, immobile, à une hauteur invariable au-dessus du sol, il perçoit après quelques instants une fatigue analogue à celle qu'il ressent quand il a soulevé les briques. Mais pour le Physicien il n'y a pas eu « travail » si le déplacement du point d'application de la force est nul.

Comme la notion confuse d'effort musculaire nous a servi à la page 16 à dégager l'idée précise de force, la notion de fatigue musculaire nous aide ici seulement à comprendre ce qu'on convient en Physique d'appeler Travail. Dans tout travail interviennent la *force* et le *déplacement* de son point d'application (voir *Lecture*, p. 81).

2. DÉFINITION PLUS GÉNÉRALE. — Supposons que l'ouvrier ait à effectuer son ouvrage en hissant les briques au moyen d'un monte-charge dont la cage est guidée par deux colonnes verticales (fig. 3) et que, pendant le *déplacement* AA' de son point d'application, la force exercée $\vec{F}$ *reste constante* en grandeur, direction, sens, dans le plan de figure.

Cette force peut être remplacée par deux composantes : $\vec{f}$ verticale et $\vec{\varphi}$, horizontale.

La composante $\vec{\varphi}$ ne peut ni faire monter, ni faire descendre les briques; elle ne contribue en aucune façon à produire du travail.

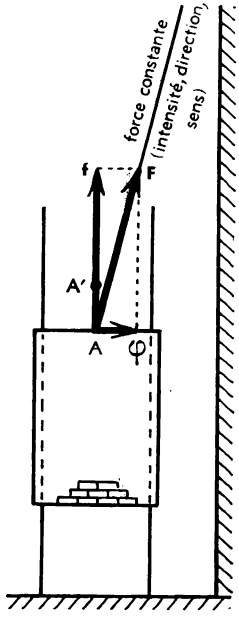


FIG. 3.

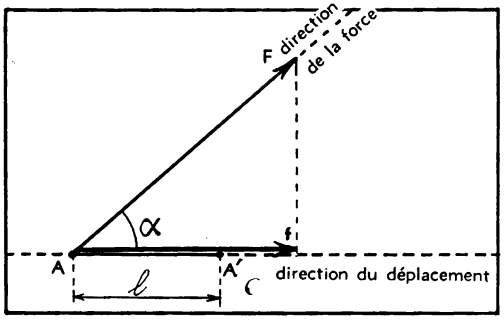


FIG. 4. — *Définition du travail.*

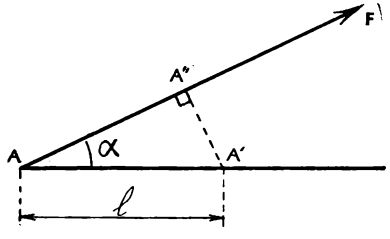


FIG. 5.

La force $\vec{f}$ seule est une composante *efficace*. Or le « gain » que l'on a réalisé quand la cage et les briques ont atteint l'altitude du point A' est obtenu quand la force $\vec{f}$ verticale a déplacé son point d'application A sur sa propre direction. Le travail correspondant est égal, numériquement, au produit $f.AA'$. Si donc nous convenons, ce qui est naturel, que le travail de $\vec{\varphi}$ est nul, nous pouvons dire que le travail de $\vec{F}$ se réduit au travail de sa *projection* $\vec{f}$ sur la direction du déplacement. C'est ce qui est résumé par la définition suivante :

Définition générale : *Le travail d'une force d'intensité et de direction constantes, quand le point d'application se déplace sur une droite dont la direction est différente de celle de la force, est numériquement égal au produit du déplacement par l'intensité de la projection de la force sur le déplacement.*

Soient (fig. 4) : F l'intensité de la force, l la longueur du déplacement, α l'angle des deux directions $\overrightarrow{\text{force}}$ et $\overrightarrow{\text{déplacement}}$, l'intensité de la projection f est $F\cos\alpha$ et le travail a comme expression :

$$\mathcal{T} = F.l.\cos\alpha.$$

Remarques :

1. Traçons la projection AA'' du déplacement AA' sur la direction de la force (fig. 5). La longueur de cette projection est $AA'' = AA' \cos\alpha = l.\cos\alpha$ et l'expression du travail de la force $\vec{F}$ est $\mathcal{T} = F.AA''$ ce qui s'exprime :

Le travail d'une force constante en grandeur, direction et sens, pour un déplacement rectiligne quelconque du point d'application

est numériquement égal au produit de l'intensité de la force par la longueur de la projection du déplacement sur la force.

2. La définition contient quelques cas particuliers importants, qui correspondent à des valeurs remarquables de l'angle α.

$\alpha = 90^o$ (fig. 6). La force est constamment perpendiculaire au déplacement; $Cos\ \alpha = O$; $\mathcal{T} = O$; c'est bien ce que nous avons admis déjà.

$\alpha = 0^o$ (fig. 6). La force et le déplacement ont même direction et *même sens*. F et f sont des intensités égales et $Cos\ \alpha = 1$. Donc :

$$\mathcal{T} = \boldsymbol{F.l.}$$

Ce résultat est bien la relation que nous avons convenu de prendre pour définir le travail dans le cas d'une force *verticale* (F) dont le point d'application subit un déplacement *vertical* (l).

$\alpha = 180^o$ (fig. 6). Ce cas se ramène au précédent, mais le déplacement s'effectue en sens inverse du sens de la force. Nous y reviendrons bientôt.

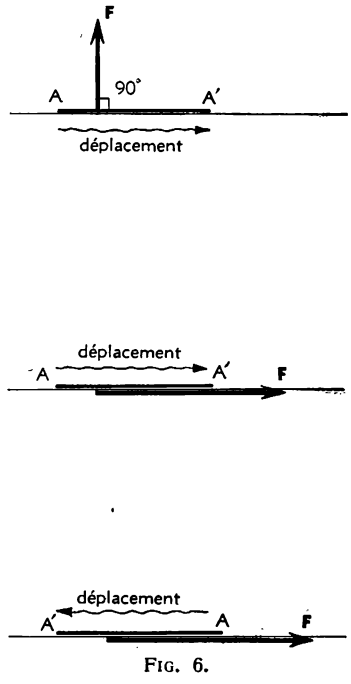


FIG. 6.

3. TRAVAIL MOTEUR. TRAVAIL RÉSISTANT. — L'observation de chaque jour nous enseigne qu'il y a des forces qui « tirent » ou « poussent » les objets, pour aider à leurs déplacements, tandis que d'autres forces les « retiennent » en contrariant ces déplacements.

Ainsi le wagonnet (1) (fig. 7) soumis à la force $\vec{F}$ se déplace de A vers A' *dans le sens même* de la force. Le vecteur $\vec{F}$ et le déplacement, orienté du point A (départ) vers le point A' (arrivée), forment un angle α *nul*, dont le cosinus est égal à $+ 1$. Si, par convention, nous comptons positivement l'intensité F de la force et la longueur l du déplacement, le travail est $\mathcal{T} = F \times l \times (+ 1)$. Il est donc représenté par un nombre *positif*. Or ce travail est celui d'une force qui provoque ou favorise le déplacement et qu'on peut nommer à cause de cela *force motrice*. Son travail est désigné sous le nom de ***travail moteur.***

Au contraire le wagonnet (2) descend la pente malgré l'ouvrier qui « retient » la charge en exerçant la force $\vec{F}$. Avec la même convention, orientant le déplacement de A (départ) vers A' (arrivée), l'angle formé par le vecteur $\vec{F}$ et AA' est $\alpha = 180^o$. On

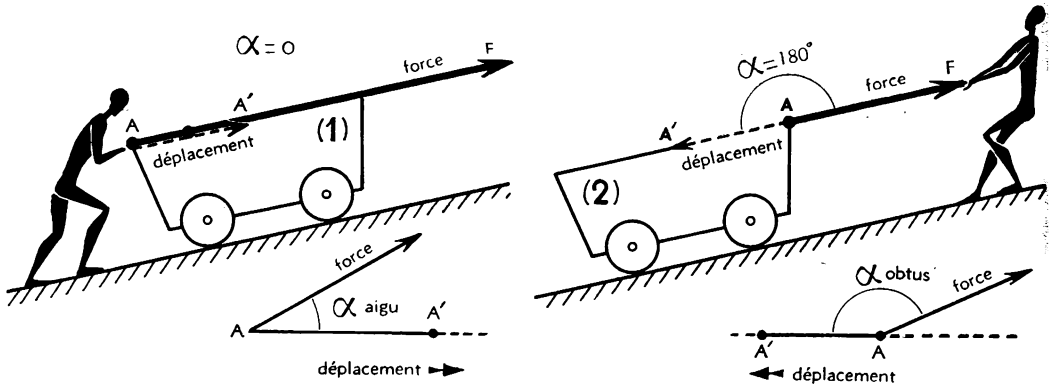


FIG. 7. — *Travail moteur; travail résistant.*

apprend en Mathématiques que $\cos 180^\circ = -1$. Par suite, si F et l sont positifs, le travail est :

$$\mathcal{T} = F \times l \times (-1).$$

Il s'exprime par un nombre *négatif*. Or c'est là le travail d'une force qui « contrarie » un mouvement et qu'on peut nommer *force résistante*. Son travail est dit ***travail résistant.***

On généralise aisément au cas où la force et le déplacement n'ont pas même direction. Si l'angle α de $\vec{F}$ avec $\overrightarrow{AA'}$ est aigu (cosinus > 0) le travail est moteur et affecté du signe $+$. Si l'angle de $\vec{F}$ avec $\overrightarrow{AA'}$ est obtus (cosinus < 0) le travail est résistant et affecté du signe —. Ainsi le travail s'exprime par un nombre *algébrique* et, quand on doit faire la somme de plusieurs travaux, c'est une *somme algébrique* qu'on obtient.

4. UNITÉS DE TRAVAIL. — L'unité de travail dépend évidemment des unités servant à exprimer la force et le déplacement.

Définitions

— ***Le kilogrammètre (kgm)*** *est le travail d'une force de 1 kilogramme-force dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.*

— ***Le joule (J)*** *est le travail d'une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.*

— ***L'erg (erg)*** *est le travail d'une force de 1 dyne dont le point d'application se déplace de 1 centimètre dans la direction de la force.*

Comme nous avons appris que 1 *kgf* = 9,81 *N*, nous noterons que

$$\boxed{1 \text{ kgm} = 9{,}81 \text{ J}.}$$

De plus, comme la dyne est rattachée au newton par la relation $1\ N = 10^5$ *dynes* et que $1\ m = 10^2$ *cm*, on déduit que :

$$1\ J = 10^7\ \textbf{ergs.}$$

Exemple de calcul d'un travail : *Un tracteur exerce sur le cable de remorquage d'une péniche une force de 100 kgf. Quel est le travail effectué quand la péniche a effectué un parcours de 1 km si le cable fait, avec l'axe de marche du bateau, un angle de 30°?*

L'application directe de la définition du travail : $\mathcal{T} = F.l.\cos\alpha$ donne

$$\mathcal{T} = 100 \times 1\,000 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \simeq \textbf{86 500 kgm.}$$

C'est, ici, un travail *moteur*.

5. EXPRESSIONS DE QUELQUES TRAVAUX PARTICULIERS.

1. TRAVAIL DE LA PESANTEUR. — Soit un objet de poids P (fig. 8) dont le centre de gravité passe de A, à l'altitude h_1 au-dessus du sol, à *B*, à l'altitude h_2, en suivant une ligne sinueuse quelconque *A*, *G*, *G'*, *G''*... *B*, contenue ou non dans un même plan vertical. Proposons-nous d'évaluer le travail effectué par la pesanteur au cours de ce déplacement.

Découpons le chemin suivi par le centre de gravité en *éléments* curvilignes assez petits pour que chacun soit peu différent de la corde qui joint ses extrémités. Soit *GG'* un de ces éléments.

Une valeur approchée du travail de $\vec{P}$ (force constante en grandeur, direction, sens) s'écrit, pour l'élément GG' :

$$\mathcal{T}' = P \times (\textit{projection de } GG' \textit{ sur la direction de } \vec{P})$$

Soit : $\mathcal{T}' = P.GH$

ou encore, si a' désigne la longueur *GH* que l'on reporte sur une verticale H_0H_1 :

$$\mathcal{T}' = P.a'.$$

De même, pour l'élément suivant *G'G''* :

$$\mathcal{T}'' = P.a'' \quad \text{etc...}$$

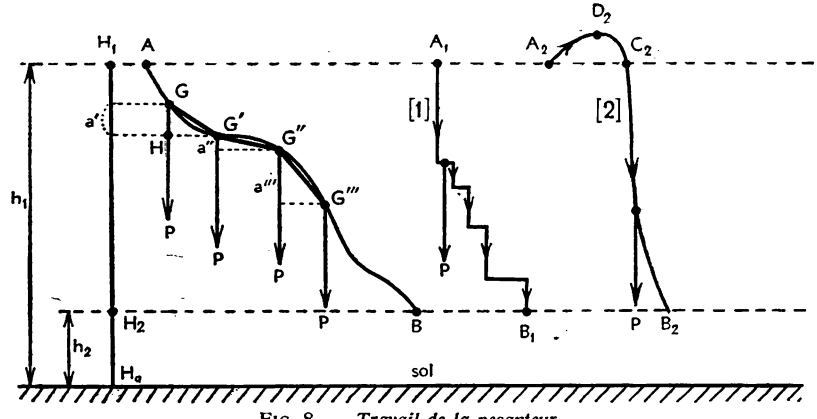


FIG. 8. — *Travail de la pesanteur.*

La valeur approchée du travail total sera obtenue en faisant la somme algébrique de tous ces termes, rencontrés de A à B.

$$\underset{(approché)}{\mathcal{T}} = P\,(a' + a'' + a''' + ...).$$

Cette valeur sera d'autant plus voisine de la valeur exacte que le découpage de la ligne suivie par le centre de gravité, de A à B, comportera un plus grand nombre d'arcs élémentaires. A la limite, la ligne *brisée* G, G', G''..., se confond avec la ligne *courbe* réellement suivie par le centre de gravité. La somme des termes $a + a'' + a'''$.... est égale à la *différence d'altitude* entre les points A et B. L'expression du travail total est donc :

$$\mathcal{T} = \boldsymbol{P\,(h_1 - h_2)}.$$

Le travail de la pesanteur est numériquement égal au produit de son intensité par la différence des altitudes des deux points extrêmes occupés par le centre de gravité. ***Il ne dépend pas du chemun suivi par le centre de gravité.***

Ainsi, quand de l'eau s'écoule d'un lac de montagne jusqu'au bas de la vallée le travail de la pesanteur (moteur) est le même, que la chute s'effectue par une série de cascades ou à l'intérieur de conduites, ou en pente douce. De même quand vous vous élevez d'un étage en montant l'escalier votre poids effectue un travail (résistant) égal à celui qu'il effectuerait si vous utilisez une corde lisse.

Remarque. — Les trajets [1] et [2] de la figure 8 correspondent à des travaux *égaux* de la pesanteur si le poids est le même dans les deux cas, puisque A_1 et A_2 sont à la même altitude h_1, B_1 et B_2 étant tous les deux à la même altitude h_2. Pendant le trajet [2] la portion A_2C_2 comprend A_2D_2 (travail **résistant** du poids) et D_2C_2 (travail **moteur** du poids, égal, en valeur absolue, au précédent).

2. *TRAVAIL D'UNE FORCE CONSTANTE EN GRANDEUR, DIRECTION, SENS, POUR UN DÉPLACEMENT QUELCONQUE DU POINT D'APPLICATION* (fig. 9). Soit une force $\vec{F}$, constamment parallèle à une droite (Δ), d'intensité F, de sens constant. Son point d'application décrit une *courbe* d'extrémités A et B, plane, dont le plan contient la force. On voit que le raisonnement effectué pour le travail de la pesanteur est ici encore applicable, en décomposant la ligne suivie par le point d'application en *éléments MN, NP, PQ..., etc.* D'où le résultat :

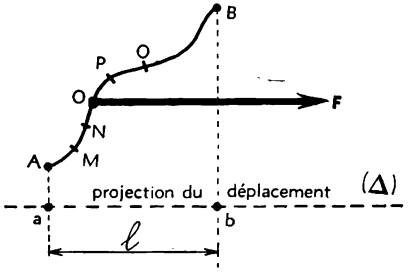


FIG. 9.

Le travail de la force est numériquement égal au produit de l'intensité de cette force par la projection du déplacement sur la droite (Δ). *Sa valeur* $\mathcal{T} = \boldsymbol{F.l}$ *ne dépend donc que de la situation des points extrêmes A et B.*

3. *TRAVAIL D'UN COUPLE DE MOMENT CONSTANT.* — Examinons seulement un cas particulier (fig. 10). Un solide est soumis à un couple, de *moment constant* $\mathcal{C}$, réalisé par deux forces d'intensités F appliquées l'une en A, l'autre en B. Supposons que le

solide soit mobile autour d'un axe O perpendiculaire au plan du couple, au milieu de AB, et qu'il effectue autour de cet axe une rotation mesurée par l'angle α. — Chacune des forces reste tangente à la circonférence décrite par son point d'application. Par suite son travail est égal au produit de son intensité par la longueur de l'arc décrit par le point d'application. Soit :

pour la force $\vec{F}$ appliquée en A : $\mathcal{T}_A = F.\widehat{AA'}$

pour la force $\vec{F}$ appliquée en B : $\mathcal{T}_B = F.\widehat{BB'}$.

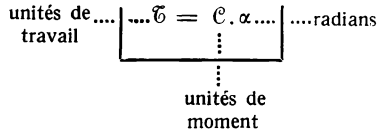
Or ces arcs, interceptés par un angle au centre α, sur une circonférence de rayon R ont pour expressions :

$$\widehat{AA'} = \widehat{BB'} = R.\alpha_{\text{radians}}.$$

Le travail est la somme des travaux des deux forces, tous deux *moteurs* :

$$\mathcal{T} = 2\,F.R.\alpha.$$

Comme le produit F.2R représente le moment $\mathcal{C}$ du couple appliqué :



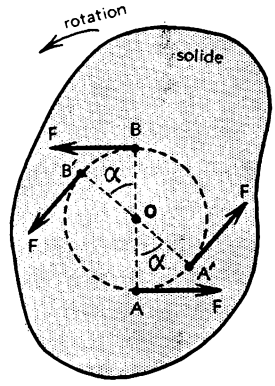


FIG. 10. — *Travail d'un couple.*

Exemple : *Pour enfoncer un tire-bouchon on doit exercer un couple constant, de moment $\mathcal{C} = 0{,}2$ m.N. Quel est le travail effectué pour une rotation de 1/4 de tour?*

L'angle de rotation est, en *radians* : $\alpha = \dfrac{2\pi}{4} = \dfrac{\pi}{2}$.

Le travail est donc :

$$\mathcal{T} = 0{,}2 \times \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{10}$$

$$\mathcal{T} \simeq 0{,}31 \text{ joule.}$$

B. PUISSANCE

6. DÉFINITION. — Dans la vie courante, comme dans l'industrie, les travaux sont effectués par des appareils appelés *machines* ou *moteurs*. De nombreux moteurs fonctionnent autour de nous : moteur humain qui gravit un escalier, moteur animal qui tire la charrue, moteurs mécaniques des voitures automobiles, moteurs électriques, etc.

Dans le choix d'une machine qui doit effectuer un certain travail, intervient presque toujours le temps que durera l'opération. Une machine, comme une grue, par exemple,

est dite plus *puissante* qu'une autre si elle peut soulever le même paquet de briques, de la même hauteur en moins de temps.

Définition : *La puissance d'une machine est numériquement égale au quotient du travail qu'elle fournit par le temps qu'elle met pour accomplir ce travail.*

Si $\mathcal{T}$ est le travail effectué, t la durée de l'opération, la puissance moyenne s'exprime par :

puissance .... $\mathcal{P} = \dfrac{\mathcal{T}}{t}$ .... travail / .... temps

7. UNITÉS. — L'unité de temps est toujours la *seconde*; les unités de puissance dérivent donc aisément des unités de travail :

— ***Le kilogrammètre par seconde (kgm/s)*** (1) *est la puissance d'un moteur qui, travaillant régulièrement, effectue un travail de 1 kilogrammètre en 1 seconde.*

Le kilogrammètre par seconde apparaît cependant comme une unité trop petite pour les besoins des mécaniciens et des ingénieurs. On préfère souvent une autre unité, le *cheval-vapeur* (*ch*) (2).

$$\mathbf{1\ ch = 75\ kgm/s.}$$

— ***Le watt (W)*** (3) *est la puissance d'un moteur qui, travaillant régulièrement, effectue un travail de 1 joule en 1 seconde.*

Le watt et ses multiples (*kilowatt* : *kW*, *hectowatt* : *hW*) sont particulièrement employés par les Électriciens. L'usage n'en est pas encore très répandu en Mécanique, mais on doit souhaiter, à cet égard, que les techniciens de tous ordres s'habituent au nouveau système d'unités dans lequel l'unité de *force* est le *newton*, l'unité de *travail* le *joule*, l'unité de *puissance* le *watt*. On peut établir une correspondance entre le cheval-vapeur et le kilowatt :

$$\mathbf{1\ ch} = 75\ \text{kgm/s} = 75 \times 9{,}81\ \text{J/s (ou watt)}.$$
$$= 736\ \text{W} = \mathbf{0{,}736\ kW.}$$

Pour les calculs rapides on peut adopter :

$$1\ \text{ch} \simeq \frac{3}{4}\ \text{kW}.$$

(1) On notera l'abréviation obligatoire pour *seconde* : s (et non ″).

(2) L'origine du mot *cheval-vapeur* remonte à la construction par Watt des premières machines à vapeur pratiquement utilisables. Cet inventeur avait coutume de caractériser chacune de ses machines par le *nombre de chevaux* attelés à un manège qu'elle pouvait remplacer.

(3) WATT (v. notice biographique).

Remarque : le kilowatt-heure (kW-h). Cette unité est très employée en électricité pratique. Elle représente le ***travail*** effectué ***en une heure*** par un moteur d'une puissance de 1 kW.

Quand un abonné paie sa consommation d'électricité, il achète **l'équivalent en travail** dont son installation lui a permis de disposer à domicile. Il est donc incorrect de dire que « l'électricité est facturée à x francs le kilowatt »; il faut dire « x francs le *kilowatt-heure* ».

L'erg par seconde (erg/s). — *L'erg par seconde est la puissance d'un moteur qui, travaillant régulièrement, effectue un travail de 1 erg en 1 seconde.*

Cette unité est réservée à des calculs très spéciaux de la Physique; c'est une unité *très petite.*

Puisque : $1 \text{ kgm} = 9{,}81 \text{ J} = 9{,}81 \times 10^7 \text{ erg}$,

on calcule que : $1 \text{ ch} = 75 \times 9{,}81 \times 10^7 \text{ erg/s} \simeq 75 \times 10^8 \text{ erg/s}$;

ou encore : $1 \text{ W} = 10^7 \text{ erg/s}$.

Exemple numérique : *Calculons la puissance d'une locomotive qui exerce sur un train marchant à 72 km/h une force de 1 500 kgf (ou, à peu près, 15 000 N) :*

En une seconde le point d'application de la force se déplace de :

$$l = \frac{72\,000}{3\,600} = 20 \text{ m}.$$

Le travail de la force est donc : $\mathcal{T} \simeq 15\,000 \times 20 = 300\,000$ J. La puissance de la locomotive est :

$$\mathcal{P} \simeq \mathbf{300\ kW} \qquad \text{(à peu près } \textit{400 chevaux}\text{)}.$$

8. QUELQUES PUISSANCES. — La Physique et la vie industrielle nous offrent les moteurs les plus divers, dont les puissances couvrent une gamme extrêmement étendue. Voici quelques nombres, qui ne sont que des *ordres de grandeurs.* A côté des indications en watts ou kilowatts on a rappelé, approximativement, les valeurs correspondantes en chevaux-vapeur :

	W	ch
Mécanisme d'une montre-bracelet	1/1000 W	1/1 000 000
Ouvrier limant à l'établi	20 W	1/30
Cheval en service continu	300 à 400 W	1/2
Cycliste (route plate, à 15 km/h)	75 W	1/10
Moteur de voiture automobile de tourisme	jusqu'à 250 kW	jusqu'à 300 ch (1)
Locomotive	700 à 4 500 kW	1 000 à 6 000 ch
Moteur d'avion		1 000 à 4 000 ch
Moteur de fusée	100 000 kW	

Certaines centrales électriques, avec toutes leurs machines, peuvent développer une puissance totale supérieure à 400 000 kW soit plus de 500 000 chevaux-vapeur.

A la fin de ce chapitre et à titre de révision, nous croyons utile de rassembler dans un tableau les symboles des unités mécaniques fondamentales de *longueur*, *temps*, *force*, *travail* et *puissance*, avec les correspondances qu'il faut retenir.

---

(1) La *puissance fiscale* d'une automobile est une indication administrative conventionnelle sans rapport direct précis avec la puissance réelle du moteur. Aussi une voiture dont le moteur est taxé à 5 CV (écriture administrative) peut développer, à *plein régime*, une puissance voisine de 40 ch.

9. RAPPEL DES UNITÉS MÉCANIQUES.

longueur. . .	m	**m**	cm
temps	s	**s**	s
force.	kgf	**N**	dyne
	1 kgf = 9,81 N		
moment . . . de force ou de couple.	m.kgf	**m.N**	cm.dyne
travail. . . .	kgm	**J**	erg
	1 kgm = 9,81 J		
puissance. . .	kgm/s	**W**	erg/s
	1 ch = 75 kgm/s = 736 W		

EXERCICES

1. Une cigarette étant horizontale sur une table, quel est en ergs le travail à accomplir pour la placer dans une position verticale, debout. (Un paquet ordinaire pèse 20 gf, contient 20 cigarettes de longueur 7 cm, de diamètre 7 mm, qu'on assimilera à des corps homogènes.)

Rép. : 3 090 ergs.

2. Rectifier les expressions suivantes :

Une force de 1 kgm; une puissance de 1 erg; une automobile de force 30 ch; le travail fourni est de 30 000 kW; une presse d'une puissance de 50 tonnes.

3. Un enfant lance en l'air une balle de 20 g qui s'élève de 20 m. Quel est en kgm le travail de la pesanteur? Est-il moteur ou résistant?

Rép. : 0,4 kgm; résistant.

4. Une équipe de 10 ouvriers tire un wagon par l'intermédiaire d'un câble qui fait un angle de 30° avec la direction de la voie. Chaque ouvrier développe une force constante de 15 kgf. Quel est le travail accompli quand le wagon a parcouru 100 m?

Rép. : 12 975 kgm.

5. Le corps moteur d'une horloge pèse 15 kgf; on le remonte tous les 8 jours d'une hauteur de 2 m. Quelle est en ch la puissance moyenne nécessaire pour le fonctionnement de l'horloge.

Rép. : $\frac{1}{1\,728\,000}$ ch.

6. Un homme pesant 75 kgf gravit 5 étages de 3 mètres en 2 minutes. Quelle puissance développe-t-il?

Rép. : $\frac{1}{8}$ ch.

7. Un *ch* vaut combien de watts?

Rép. : 1 ch $\simeq$ 736 W.

8. Une locomotive développant 200 ch, pesant 50 tonnes, remorque en palier un train de 200 tonnes. La force de frottement des roues sur les rails peut être évaluée à 3,6 kgf par tonne entraînée. Quelle est la vitesse du convoi en kilomètres à l'heure?

Rép. : 60 km/h.

9. Une usine électrique, construite à l'altitude 750 m reçoit, pour alimenter ses turbines, de l'eau venue d'un lac situé à 1 500 m d'altitude. La puissance fournie est 20 000 kW. Quel est le débit d'eau en mètres cubes par minute?

Rép. : 163 m^3/mn.

10. Combien le kilowatt-heure vaut-il de joules?

11. Sur une vitre verticale, de dimensions 40 × 40 cm, un insecte, de poids 0,2 gf, partant d'un coin inférieur atteint un coin supérieur en grimpant, pendant 20 secondes. Quelle puissance moyenne a-t-il développé? (choisir une unité convenable).

12. Un cycliste, pesant 70 kgf, porte tout son poids sur une pédale qui passe ainsi du point le plus haut au point le plus bas. Quel travail a été accompli si le rayon de la manivelle est 17 cm? La vitesse du cycliste est alors, en palier, de 36 km/h. Quelle puissance moyenne développe-t-il en admettant que le *développement* de sa machine (distance parcourue pour un tour de pédale) est 6 mètres?

13. Une automobile roulant sur route horizontale à 108 km/h son moteur fournit une puissance de 56 ch. On demande la valeur (en N et en kgf) de la force résultante de toutes les résistances, supposées parallèles au déplacement.

14. Un constructeur d'automobiles annonce pour un de ses modèles un couple moteur égal à 14 m.kgf pour une vitesse de rotation du moteur de 4 800 tours par minute. Quelle est en chevaux et en kilowatts la puissance de ce moteur, à ce régime?

PROBLÈMES

1. 1° Une automobile, dont le poids est 1 200 kgf, roule, sur route horizontale, à la vitesse de 72 km/h. Le moteur fournit alors une puissance de 12 ch. Calculer la force, supposée constante et parallèle au déplacement, qui représente l'ensemble des résistances passives.

2° Quelle est la puissance nécessaire pour faire gravir à la voiture, à la vitesse constante de 72 km/h, une côte qui s'élève en moyenne de 3 mètres pour 100 mètres de route?

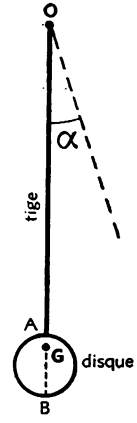
3° La voiture descend, à 30 km/h, moteur arrêté, une pente à 5 % (5 m de dénivellation pour 100 m de route). Calculer le travail effectué par les freins en une minute, en admettant que les autres résistances à l'avancement, toujours parallèles à la route, aient comme résultante une force de 30 kgf.

4° Le diamètre extérieur d'une roue est 60 cm; celui d'un tambour sur lequel appuient les mâchoires d'un frein de 24 cm. Calculer la force de freinage, supposée constante et tangente à la circonférence de chacun des quatre tambours, qui est capable de maintenir dans les conditions du paragraphe précédent, la vitesse de 30 km/h sur la pente à 5 %.

2. Un balancier d'horloge est constitué par une tige métallique homogène, de section constante, de longueur $AO = 96$ cm, de poids $P = 100$ gf, soudée à un disque plein, homogène, de diamètre $AB = 12$ cm. L'ensemble peut osciller dans un plan vertical autour d'un axe horizontal passant par O et perpendiculaire au plan du disque.

1° Quel poids P' faut-il donner au disque pour que le centre de gravité G de ce balancier se trouve à 1 mètre de l'axe O?

2° On applique à G une force horizontale $\vec{F}$ qui maintient le balancier dans une position telle que la tige fait un angle de $\alpha = 30°$ avec la verticale. Calculer F; calculer et dessiner la force $\vec{R}$ exercée par le support sur l'axe O.

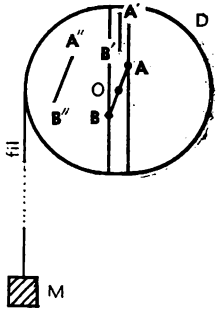


3° Exprimer F et R en fonction de l'angle α pour une inclinaison quelconque de la tige à l'équilibre.

4° Quel travail $\mathcal{C}$ faut-il effectuer pour amener la tige de la position verticale dans une position ou son inclinaison α est telle que $\cos\alpha = 0{,}98$?

5° L'appareil, amené dans la position précédente, est abandonné à ses oscillations. Celles-ci s'amortissent régulièrement et le balancier s'arrête définitivement au bout de 3 minutes. On admet que, pendant ce temps, le travail des résistances passives qui freinent le mouvement est égal au travail $\mathcal{C}$ calculé dans la précédente question. Quelle est la puissance moyenne d'un moteur capable d'entretenir, sans amortissement, le mouvement du balancier?

Ce moteur étant constitué par un cylindre de poids 15 kgf, qui peut tomber lentement d'une hauteur de 2 mètres. Combien de temps peut fonctionner l'horloge sans qu'on ait à remonter le cylindre?



3. Un disque homogène D peut tourner, dans un plan vertical fixe, autour d'un axe horizontal fixe O. Il porte une étroite rainure, dans laquelle on peut engager une lame de tournevis, de largeur $AB = 8$ *mm*, d'épaisseur négligeable, qui exerce, en A et B, symétriquement par rapport à O, deux forces égales d'intensité 8 newtons. Pendant la rotation du tournevis ces forces restent toujours perpendiculaires à AB. On peut ainsi soulever un objet M, de poids 2 000 gf, attaché à un fil de poids négligeable qui s'enroule sur la périphérie du disque.

1° Quel est le couple de torsion supporté par la tige du tournevis?

2° De quelle hauteur est soulevé M quand le tournevis a fait un tour? On admettra que le travail de la main qui actionne le tournevis a été intégralement utilisé à soulever l'objet.

3° Quelle est la puissance moyenne fournie par l'opérateur si la montée a duré 5 secondes?

4° On sait qu'il est possible d'enfoncer une vis en plaçant la lame du tournevis dans la rainure de manière que les axes du tournevis et de la vis ne coïncident pas. De la même façon, on exerce maintenant l'effort en appuyant avec la lame en A' et B'. On supposera pour simplifier que la largeur de la rainure est très petite de sorte que le prolongement de $A'B'$ rencontre l'axe O. Montrer que, les forces conservant l'intensité précédente et restant perpendiculaires à la droite A'B' pendant la rotation, le travail, pour un tour du disque, a même valeur que précédemment. (On fera le bilan des travaux des deux forces, prises séparément).

5° Même question en supposant la lame du tournevis engagée dans une position $A''B''$ telle que A'' *et* B'' soient à la même distance de O. (On aura à décomposer les deux forces et à faire, pour une rotation d'un tour, le bilan des travaux des composantes).

LECTURE

Le travail.

Qu'est-ce, dans le domaine du labeur manuel, qu'un travailleur? C'est un homme qui fait un effort utile en remuant ses bras. Si nous voyions, en effet, un menuisier pousser son rabot contre une planche et rester ainsi longtemps immobile, nous dirions qu'il est peu travailleur; nous ne lui demandons pas de buter sa planche contre le valet de son établi, mais de la planer, en promenant le rabot à sa surface; c'est en faisant de façon intelligente ce mouvement et d'autres analogues qu'il gagne sa vie. Et quel que soit l'artisan au travail, mécanicien, laboureur, terrassier, nous voyons que toujours il fait effort et soutient son effort le long d'un certain chemin.

Nous obtenons gratuitement l'effort immobile; c'est celui de la table supportant nos livres; nous payons, au contraire, l'effort qui se déplace, et nous lui attribuons ainsi une valeur sociale particulière, que nous échangeons contre une autre valeur. Il n'y a point là d'exception dans le fait que l'effort immobile est parfois coûteux; si un cheval arrêté dans une pente se fatigue en retenant le tombereau auquel il est attelé, c'est que le charretier a négligé de serrer le frein ou de caler la roue. Une semblable économie peut toujours être réalisée.

On apprécie plus le travail de l'orfèvre que celui du terrassier, et tandis qu'on applaudit le cheval de course, on se soucie peu du travail qu'accomplit patiemment le cheval de tombereau. Nous attribuons ainsi, à tort ou à raison, un certain degré de qualité au travail, et nous le taxons en raison de cette appréciation. Mais la mécanique ne saurait entrer dans ces subtiles distinctions; elle ne peut mesurer que la quantité du travail, et, pour y parvenir, elle doit en donner d'abord une définition précise.

On aura une bonne définition si elle correspond à ce que le bon sens nous enseigne. Or, si nous voyons un cheval remonter le long d'une pente, deux fois plus loin qu'un autre, un tombereau également chargé, nous dirons qu'il a produit deux fois plus de travail; de même si, attelé à un tombereau deux fois plus lourd, il fait le même chemin, son travail est encore double. Nous aurons donc une bonne définition du travail en disant qu'il est proportionnel à l'effort et au chemin parcouru. C'est, en effet, cette définition que la mécanique a résumée, en disant que le travail effectué par une force est égal au produit de cette force par son déplacement.

Ch.-Ed. GUILLAUME (1)

(1) Ch.-Ed. GUILLAUME (voir notice biographique).

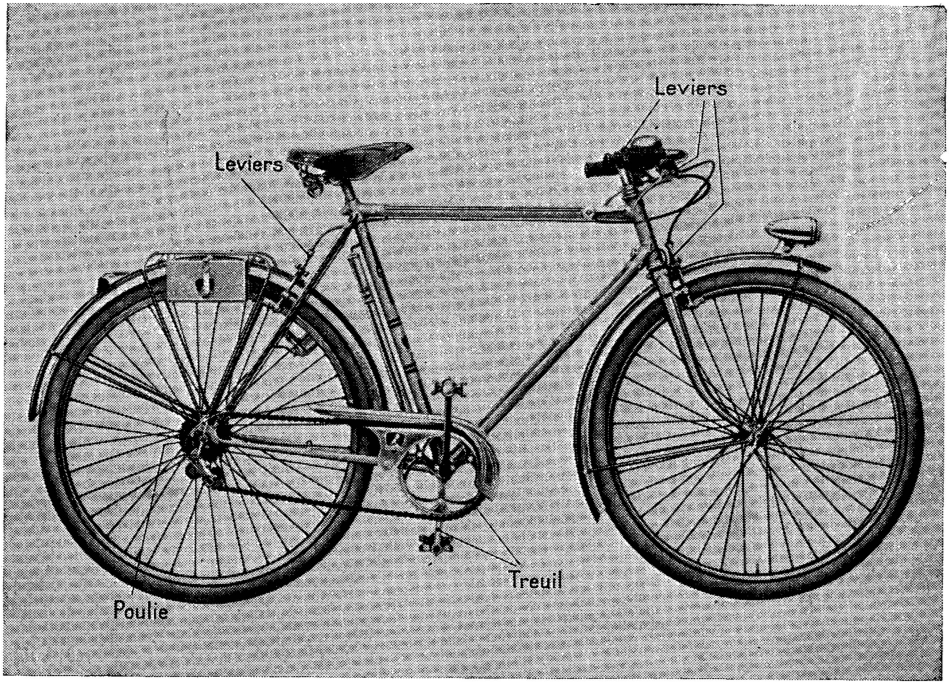


Photo Peugeot.

FIG. 1. — *La bicyclette est un bel exemple d'assemblage de machines simples; elle réunit le treuil, la poulie, et de nombreux leviers.*

7. MACHINES SIMPLES

1. Tous les gestes de la vie quotidienne s'accompagnent de certains travaux.

Certains de ces travaux, comme la marche à pied, s'accomplissent sans peine car les forces développées ne dépassent jamais les possibilités humaines. D'autres paraissent impossibles car, sous leur aspect immédiat, ils excèdent ces possibilités : on ne pourrait demander par exemple à un homme de soulever directement de terre un bloc de granit de 1 000 kilogrammes!

Pour effectuer certains travaux avec plus de facilité, l'homme a créé des appareils appelés ***machines simples***, comme les *leviers*, les *poulies*, le *plan incliné*, le *treuil*.

A. LES LEVIERS

Un levier est essentiellement formé d'une tige rigide, droite ou non, AB, s'appuyant sur un point ou un axe O autour duquel elle peut tourner librement. O se nomme *point d'appui* (fig. 2).

Une extrémité de la tige, A, subit une force R qu'il s'agit de vaincre. R est la **résistance.** A l'autre extrémité B agit une autre force F appelée force active, ou **force motrice.**

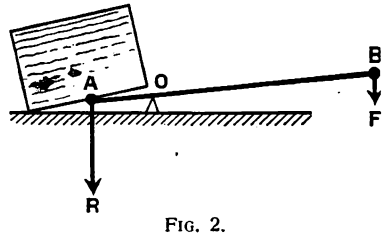


FIG. 2.

2. ÉQUILIBRE DU LEVIER. — Considérons le cas, fréquent en pratique, où les deux forces $\vec{F}$ et $\vec{R}$ sont parallèles (fig. 3). La tige est un solide mobile autour d'un axe fixe, et, quand elle est en équilibre, on peut appliquer le théorème des moments (1). Ici :

$$R.OM = F.ON$$

Ou encore :

$$\frac{F}{R} = \frac{OM}{ON},$$

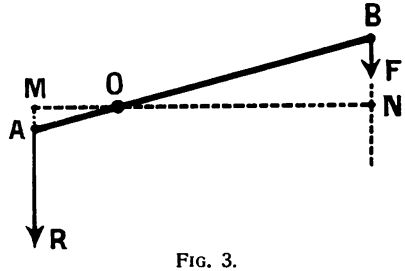


FIG. 3.

Soit, en tenant compte de la similitude des triangles OAM et OBN :

$$\frac{F}{R} = \frac{OA}{OB} \qquad [1]$$

Si, par exemple, $OA = \frac{OB}{5}$, on pourra équilibrer un fardeau de poids R = 200 kgf, accroché en A, en exerçant en B une force

$$F = 200 \times \frac{OB}{5.OB} = 40 \text{ kgf.}$$

3. FORCE SUPPORTÉE PAR UN POINT D'APPUI. — L'équilibre précédent pourrait être décrit d'une façon équivalente en indiquant que la résultante des forces $\vec{R}$ et $\vec{F}$ doit passer par O, pour qu'en O le support puisse exercer une réaction égale à l'action qu'il subit. Sur le point d'appui s'exerce donc une force $\vec{\mathcal{F}}$ de même direction, de même sens que les deux forces appliquées en A et en B, et d'intensité égale à R + F. La réaction du support est $\vec{\mathcal{R}}$; dans le cas envisagé plus haut l'intensité commune des forces $\vec{\mathcal{F}}$ et $\vec{\mathcal{R}}$ est 240 kgf.

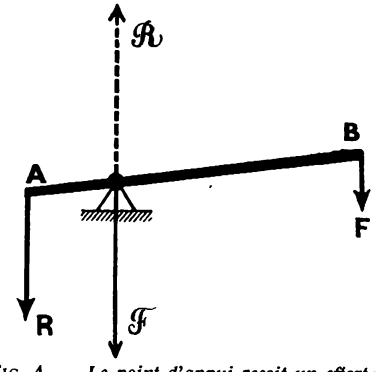


FIG. 4. — *Le point d'appui reçoit un effort; il fournit une réaction égale.*

(1) Nous ne tiendrons pas compte du poids du levier lui-même, généralement très faible par rapport aux deux autres forces $\vec{R}$ et $\vec{F}$.

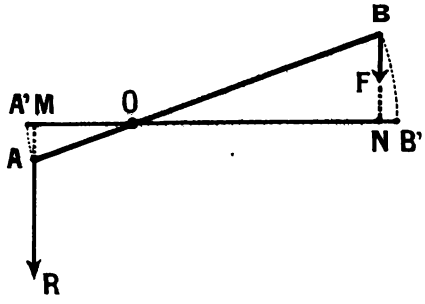


FIG. 5.

4. CONSERVATION DU TRAVAIL. — Si les frottements en O sont négligeables il suffit d'exercer en B une force d'intensité très légèrement supérieure à F pour faire basculer lentement la tige autour de O. Envisageons, pour simplifier, une rotation du levier qui l'amène de la position AB à la position A'B', horizontale, et supposons que les forces appliquées aient conservé leur direction (fig. 5).

La force motrice a effectué un *travail moteur* $\mathcal{C}_m$ numériquement égal au produit de F par la projection BN du déplacement curviligne BB' sur la direction de la force :

$$\mathcal{C}_m = \text{F.BN}.$$

La force résistante a effectué un *travail résistant* $\mathcal{C}_r$, numériquement égal au produit de R par la projection AM du déplacement curviligne AA' sur la direction de la force :

$$\mathcal{C}_r = -\text{R.AM}.$$

Écrivons le rapport de ces travaux, pris en valeur absolue :

$$\left|\frac{\mathcal{C}_m}{\mathcal{C}_r}\right| = \frac{\text{F}}{\text{R}} \cdot \frac{\text{BN}}{\text{AM}}$$

Or, dans les triangles semblables OAM et OBN : $\dfrac{\text{BN}}{\text{AM}} = \dfrac{\text{ON}}{\text{OM}}$

Soit :

$$\left|\frac{\mathcal{C}_m}{\mathcal{C}_r}\right| = \frac{\text{F}}{\text{R}} \cdot \frac{\text{ON}}{\text{OM}}$$

et, comme la condition d'équilibre mentionnée en [1] est toujours satisfaite, les frottements étant négligés : F.ON = R.OM. Par suite :

$$\left|\frac{\mathcal{C}_m}{\mathcal{C}_r}\right| = \mathbf{1}.$$

Ce résultat montre que le travail moteur est, en valeur absolue, égal au travail résistant. On dit qu'il y a ***conservation du travail*** dans le levier.

Que faut-il entendre au point de vue physique par cette propriété?

Si un homme avait dû soulever *directement* le fardeau dont le poids est R, de A en A', il aurait fourni un travail $\mathcal{C}_r = \text{R.AM}$. Grâce au levier, il a pu effectuer cette opération en développant une force F *beaucoup plus faible* que R. Mais le déplacement du point d'application est BB', *beaucoup plus grand* que AA', de sorte que finalement le travail moteur réellement fourni est exactement égal en valeur absolue au travail résistant.

On ne gagne donc rien *en travail* à employer le levier, mais on effectue ce travail de façon *plus commode*.

La conservation du travail s'applique à tous les genres de leviers que nous allons maintenant examiner.

5. LES TROIS GENRES DE LEVIERS.

1. LEVIER INTER-APPUI (ou du *PREMIER GENRE*). — C'est celui dont nous venons d'analyser le fonctionnement. La dénomination *inter-appui* rappelle que le point d'appui se trouve placé entre le point d'application de la force motrice et celui de la force résistante. A ce type appartiennent la *pince des carriers* (fig. 2), le *pied de biche* (fig. 6). Les *ciseaux*, *tenailles*, *pinces coupantes* sont des assemblages de deux leviers inter-appui agissant en même temps.

Dans l'utilisation d'un levier de ce type, il ne faut pas oublier que le point d'appui supporte une force égale a la *somme* des deux forces appliquées aux extrémités de la barre. Il est donc nécessaire de prévoir une solidité suffisante pour cet appui. Un ouvrier carrier choisit un bloc dur posé sur un sol si possible également dur.

2. LEVIER INTER-RÉSISTANT (ou du *DEUXIÈME GENRE*). — La résistance est ici placée entre la force active et le point d'appui. Il s'ensuit que les deux forces ont des sens contraires. Comme la relation d'équilibre est toujours (fig. 8) :

$$R.AO = F.BO$$

on voit que R est nécessairement supérieur à F.

A ce genre appartiennent le *couteau de boulanger*, (fig. 9), le *casse-noix*. La *brouette* est un levier inter-résistant dans lequel l'axe de la roue sert de point d'appui (fig. 10).

Dans un levier inter-résistant le point d'appui supporte une force d'intensité égale à la *différence* des intensités des deux forces appliquées. Cette force a le sens de la force résistante; c'est elle qui appuie la roue de la brouette sur le sol.

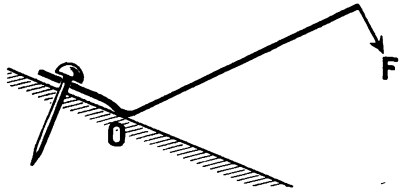


FIG. 6.

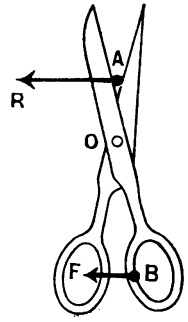


FIG. 7.

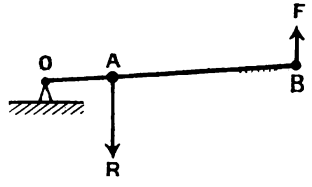


FIG. 8. — *Levier inter-résistant.*

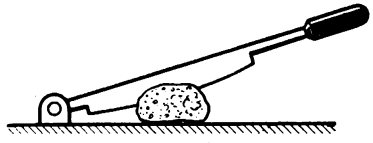


FIG. 9

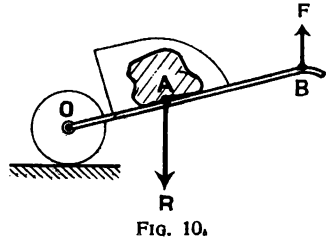


FIG. 10.

3. LEVIER INTER-MOTEUR (ou du *TROISIÈME GENRE*). — La force active est placée entre le point d'appui et la résistance (fig. 11). Il s'ensuit que F est supérieur à R. On peut alors se demander quel intérêt il y a, pour vaincre une résistance R, à déployer une force, F *plus grande que* R. C'est que, d'après la conservation du travail, ce qui est perdu en force est gagné en déplacement.

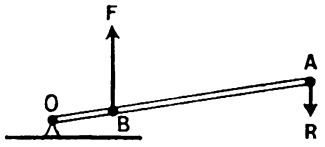


FIG. 11. — *Levier inter-moteur.*

Ainsi l'*avant-bras* (fig. 12) est limité au coude O et à la main M. L'extrémité d'un muscle puissant, le biceps, s'insère en B. Par une contraction d'amplitude relativement faible BB′, le biceps entraîne un déplacement beaucoup plus grand MM′ du point d'application de la résistance.

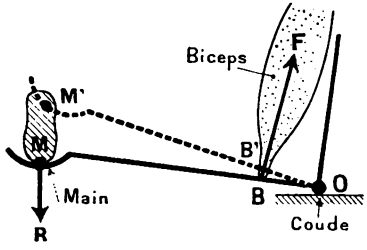


FIG. 12

Dans la *pédale du rémouleur* (fig. 13), il suffit d'un faible déplacement du pied pour réaliser un déplacement beaucoup plus grand de l'extrémité de la bielle qui actionne la meule.

Comme pour le cas précédent, dans le levier inter-moteur la force exercée sur le point d'appui a comme intensité la *différence* des intensités des deux forces appliquées; mais, ici, cette force a le sens de la force motrice. C'est elle qui appuie contre son bâti la charnière fixe de la pédale du rémouleur. Quand le biceps se contracte elle appuie l'extrémité de l'avant-bras sur le bras, à l'articulation du coude.

B. LES POULIES

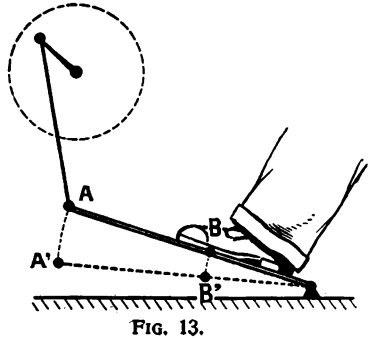


FIG. 13.

6. Une ***poulie*** est un disque épais D tournant sans frottement autour de son axe O que soutient un *étrier* E (fig. 14). Très souvent un évidement circulaire pratiqué dans l'épaisseur du disque, *la gorge*, permet à la poulie de soutenir un fil, une corde ou un *câble*. Aux deux brins du câble sont appliquées

les forces $\vec{F}$ (active) et $\vec{P}$ (résistante) situées dans le plan de la circonférence de la gorge.

Si l'axe de la poulie ne change pas de position pendant la rotation du disque la poulie est dite *fixe*. Dans la poulie *mobile*, une traction exercée sur le câble déplace en même temps la poulie et sa monture.

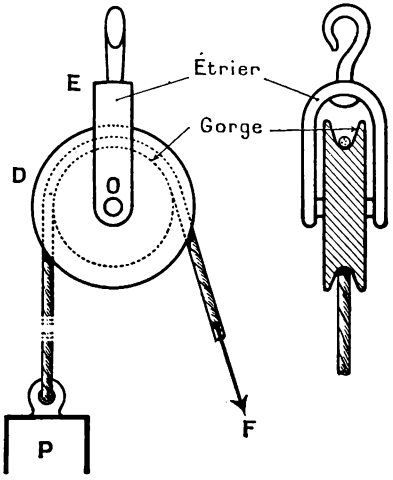


FIG. 14. — *Poulie à gorge avec son câble.*

7. POULIE FIXE.

1. ÉQUILIBRE (fig. 15). — Supposons la poulie réduite à la circonférence de la gorge et immobile sous l'action des deux forces $\vec{F}$ et $\vec{P}$. Le théorème des moments exprime la condition d'équilibre :

$$F.ON = P.OM$$

Comme ON et OM sont deux rayons d'un même cercle, on obtient :

$$\mathbf{F = P.}$$

La force active a même intensité que la force résistante; la poulie *transmet donc les forces en conservant leurs intensités.*

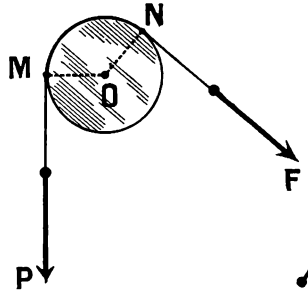


FIG. 15.

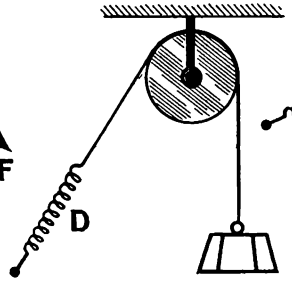


FIG. 16.

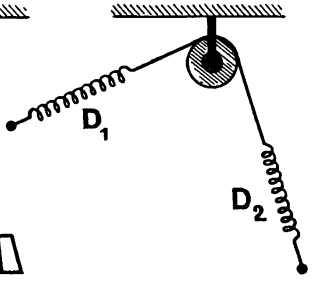


FIG. 17.

Vérification. — Le résultat précédent se vérifie aisément à l'aide de montages simples. Sur la figure 16 un poids est équilibré par la force de traction d'un dynamomètre, qui reste égale au poids quelle que soit l'inclinaison du fil. Sur la figure 17 les deux dynamomètres D_1 et D_2 ont toujours des indications identiques entre elles, quelles que soient les directions et les tensions des fils.

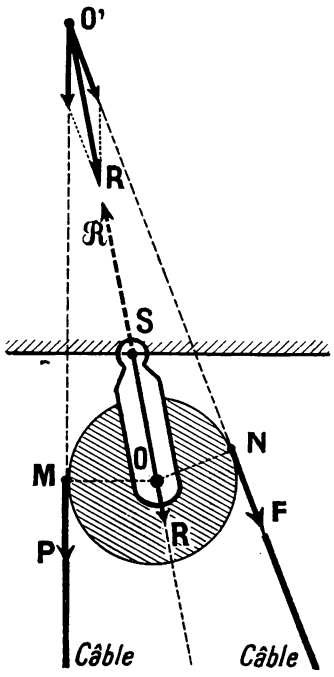


FIG. 18. — *Forces sur le point d'appui d'une poulie fixe.*

2. FORCE SUPPORTÉE PAR LE POINT D'APPUI (fig. 18). — Les deux forces $\vec{P}$ et $\vec{F}$ appliquées au disque sont concourantes en O' et, en appliquant en O' la règle du parallélogramme, on obtient leur résultante $\vec{R}$, diagonale d'un losange, puisque $\vec{P}$ et $\vec{F}$ ont même intensité. Cette force $\vec{R}$ est aussi la résultante de deux forces que l'axe de la poulie, solidaire du disque, exerce sur ses points de contact avec l'étrier. Faisant glisser $\vec{R}$ sur sa ligne d'action, nous pouvons dire aussi que l'étrier transmet cette force en S, point d'attache de la poulie sur son support. Si nous négligeons le poids de la poulie, généralement faible devant P ou F, le point S subit donc la force $\vec{R}$. Il doit pouvoir lui opposer une réaction égale $\vec{\mathcal{R}}$ et par conséquent présenter une robustesse suffisante. Dans le cas où les deux brins du câble sont parallèles

$$R = \mathcal{R} = P + F = 2F.$$

3. CONSERVATION DU TRAVAIL. — Si tous les frottements sont négligeables, la force F suffit pour soulever lentement le fardeau. Soit un déplacement AA' du point d'application de P; cette longueur de corde s'enroulant d'un côté du disque se déroule de l'autre côté. B vient en B', tel que : AA' = BB'.

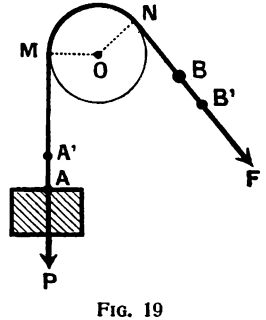


FIG. 19

Évaluons les travaux (valeurs absolues)

Travail résistant : $|\mathcal{C}_r| = P \times AA'$.

Travail moteur : $|\mathcal{C}_m| = F \times BB'$.

Comme F = P, et AA' = BB', on conclut que :

$$|\mathcal{C}_r| = |\mathcal{C}_m|.$$

Il y a donc conservation du travail dans la poulie.

L'avantage de la poulie n'est donc pas dans une modification de la force active,

puisque celle-ci reste toujours égale à la résistance. Mais grâce à l'enroulement du câble sur la gorge, la force F peut prendre une *direction quelconque*, ce qui rend souvent le travail d'une exécution plus commode. Ainsi un ouvrier peut soulever un fardeau en tirant horizontalement, ou vers le bas.

8. POULIE MOBILE (fig. 20). —Dans la poulie mobile, le fil, attaché en S à un support fixe, s'enroule sur la moitié inférieure du disque, qu'il soutient, et aboutit à la main de l'opérateur.

Si les deux brins du fil sont parallèles et *si on ne tient pas compte du poids de la poulie*, la force $\vec{P}$ est, à l'équilibre, égale et opposée à la résultante de deux forces parallèles d'intensité $\frac{P}{2}$, chacune de ces forces étant exercée par un brin. L'équilibre est donc réalisé quand la force motrice de la main est égale à $\frac{P}{2}$. C'est le point d'attache S qui supporte l'autre force $\frac{P}{2}$.

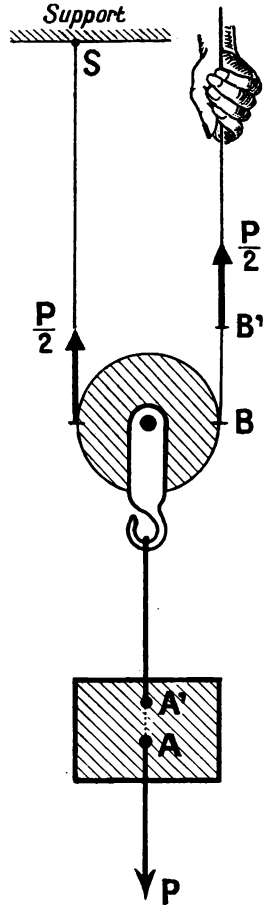


FIG. 20. — *Poulie mobile.*

Quand la main tire sur son fil, vers le haut, le point B venant par exemple en B′, elle effectue un travail moteur

$$\mathcal{C}_m = \frac{P}{2}.BB'.$$

Pendant ce temps l'axe de la poulie a été soulevé de $\frac{BB'}{2}$ seulement. C'est aussi le déplacement AA′ du point d'application du poids $\vec{P}$. Le travail résistant de cette force est donc, en valeur absolue :

$$|\mathcal{C}_r| = P.AA' = P.\frac{BB'}{2}.$$

Il y a encore ici *conservation du travail.*

9. ASSEMBLAGE DE POULIES.

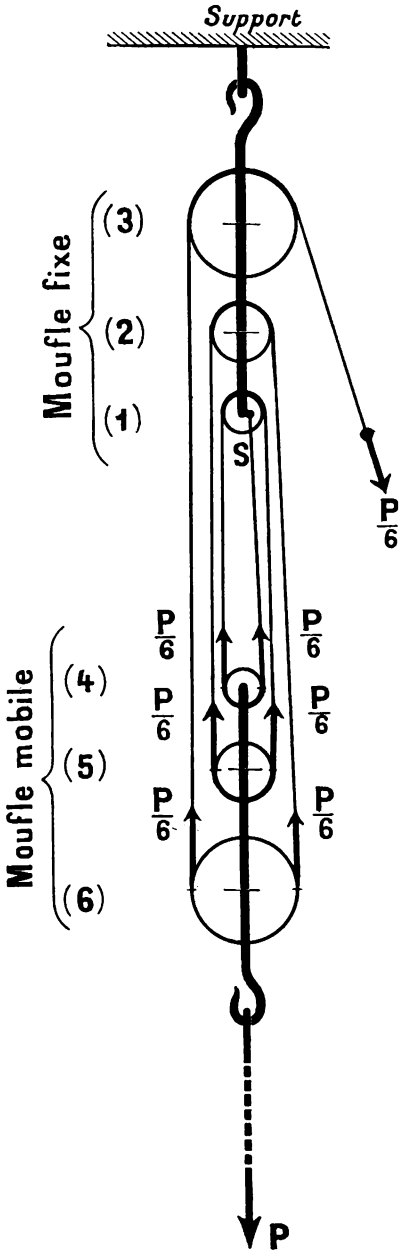


FIG. 21. — *Palan.*

Palan à brins parallèles. — En multipliant le nombre de poulies fixes et celui des poulies mobiles on parvient à fractionner, sur chaque brin de la même corde, la force totale exercée.

Le *palan* représenté par la figure 21 en est un exemple. Les trois poulies supérieures ont leurs axes portés par le même étrier; elles forment un *moufle fixe*. Les trois poulies inférieures forment un *moufle mobile*. La corde est fixée en S et s'enroule successivement sur les poulies (4), (1), (5), (2), (6), (3). Les 6 brins étant parallèles à la force $\vec{P}$, chacun d'eux exerce une force d'intensité $\frac{P}{6}$, qui est aussi la force que doit exercer la main sur le bout libre de la corde pour maintenir l'ensemble en équilibre (le poids du moufle mobile est ici négligé).

Il y a conservation du travail dans le palan, puisque chacun de ses éléments comprend une poulie fixe et une poulie mobile. D'ailleurs, on voit que pour qu'un fardeau soit soulevé sur une certaine longueur il faut faire dérouler hors de la poulie (3) une longueur de corde 6 fois plus grande.

Les poulies ne servent pas seulement à soulever des corps. Deux poulies telles que (A) et (B), réunies par une courroie ou une chaîne qui ne glisse pas sur les surfaces de contact sont ainsi rendues solidaires (fig. 22).

Si (A) est mise en rotation par un moteur, son mouvement entraîne celui de (B) qui peut, à son tour, faire fonctionner une machine-outil. (A) est alors la poulie *motrice*, (B) la poulie *menée*.

Il faut remarquer que la courroie transmet d'une poulie à l'autre les *forces*, mais que les

moments appliqués aux axes dépendent des rayons des deux poulies.

On doit souligner l'importance des poulies, surtout des poulies fixes, dans tous les domaines de la mécanique appliquée.

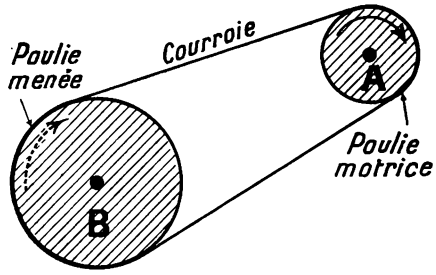


FIG. 22.

C. LE PLAN INCLINÉ

10. DEFINITIONS. — On appelle **plan incliné** tout plan P différent d'un plan horizontal (fig. 23). Un tel plan coupe un plan horizontal suivant une droite XY. Toute droite telle que AB, située dans le plan incliné et perpendiculaire à XY est dite **ligne de plus grande pente** du plan incliné Par A passe une horizontale perpendiculaire à XY; c'est la droite AC. L'angle $\widehat{BAC} = \alpha$ est **l'angle d'inclinaison.** Si, de B, on trace la perpendiculaire à AC on détermine un segment vertical BH. Le rapport $\frac{BH}{AB} = \sin\alpha$ est la **pente** du plan incliné.

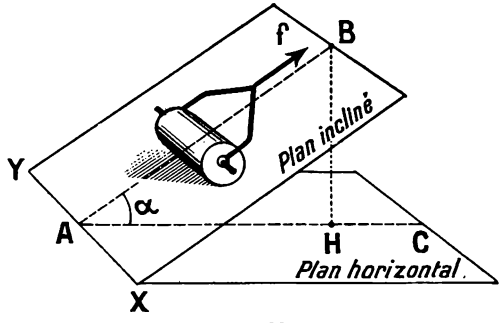


FIG. 23.

L'observation immédiate montre qu'on peut maintenir sur un plan incliné un objet (cylindre, chariot, sphère....) en lui appliquant *parallèlement à la ligne de pente* une force inférieure à son poids, et d'autant plus faible que l'angle α est lui-même plus faible.

Pour l'étude qui va suivre on supposera que toutes les forces appliquées au solide en équilibre sont situées dans le plan vertical ABC, pris comme plan de figure, et sont concourantes en G, centre de gravité.

11. ÉQUILIBRE SUR UN PLAN INCLINÉ (fig. 24). Supposons que le solide n'ait qu'un point de contact, M, avec la ligne de plus grande pente, et que les frottement soient négligeables.

Comment agit le poids $\vec{P}$?

La force verticale $\vec{P}$ admet deux composantes rectangulaires :

— l'une $\vec{f}'$, parallèle à la ligne de plus grande pente, tend à faire descendre l'objet le long du plan;

— l'autre $\vec{f}''$, perpendiculaire à la ligne de plus grande pente, n'a aucun effet utile, ni vers le haut, ni vers le bas. Elle est égale et opposée à la réaction $\vec{R}$ du plan.

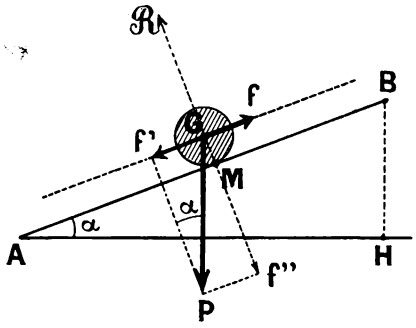


FIG. 24. — *Équilibre sur un plan incliné.*

Pour maintenir l'équilibre il suffit d'opposer à $\vec{f'}$ une force $\vec{f}$ de même direction, de même intensité, mais orientée vers le haut. Calculons cette force.

L'angle $\widehat{GPf'}$ étant égal à α (côtés perpendiculaires) le triangle rectangle GPf' donne la relation :

$$f' = P.\ \sin\alpha$$

Or $sin\alpha$ s'exprime également, dans le triangle rectangle ABH :

$$\sin\alpha = \frac{BH}{AB}$$

Il en résulte :

$$f = P.\frac{BH}{BA}.$$

Interprétons :

— Si l'angle α est très aigu (plan presque horizontal) *sin* α est voisin de *zéro;* l'intensité *f* est *faible.* Elle est nulle pour $\alpha = 0$.

— Si l'angle α est voisin de 90° (plan presque vertical) *sin* α est voisin de *1*; l'intensité *f* est *voisine de P.* A la limite elle vaut P.

Exemple : *Une barrique pesant 210 kgf doit être chargée sur le plateau d'un camion à 1 mètre du sol, à l'aide d'un plan incliné de longueur 3 mètres. Quelle force faut-il développer pour la maintenir sur ce plan incliné?*

$$f = 210 \times \frac{1}{3} = 70 \text{ kgf.}$$

Vérification expérimentale (fig. 25). — On peut construire un plan incliné d'étude avec une planche de bois dur ciré ou recouvert d'une plaque de verre pour diminuer le plus possible les frottements. Sur cette surface est posé un cylindre ou un chariot, assez lourd. Un dynamomètre permet de mesurer les forces parallèles à la ligne de pente. Comme la longueur du plan incliné est invariable, sa *pente* (soit $sin\alpha$) est proportionnelle à la hauteur *h.* On donne à ***h*** différentes valeurs et pour chacune on mesure ***f***. Voici quelques résultats :

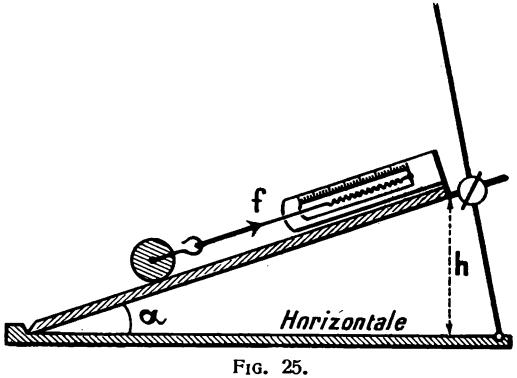


FIG. 25.

$h_{(mm)}$	40	60	100	150	200	300
$f_{(kgf)}$	0,020	0,033	0,045	0,075	0,105	0,150

On observe que les rapports f/h sont sensiblement égaux, ce qui vérifie que *la force développée, à l'équilibre, est proportionnelle à la pente du plan incliné.*

A défaut de dynamomètre on peut faire agir les forces f par l'intermédiaire d'un fil qui, passant par une poulie fixe installée en B (fig. 24), est tendu par des poids connus.

12. FORCE SUPPORTÉE PAR LE POINT D'APPUI. — Ici, le point d'appui est le point M. La force qui s'exerce en ce point est $\vec{f}''$. On voit que :

$$f''^2 = P^2 - f'^2$$

Soit, pour l'exemple précédent :

$$f''^2 = 210^2 - 70^2 = 39\,200$$

$$f'' \simeq 198 \text{ kgf.}$$

Cette force est égale et opposée à la réaction $\vec{\mathcal{R}}$ exercée par le plan sur la barrique.

13. CONSERVATION DU TRAVAIL. — Reportons-nous à la figure 24 pour évaluer le travail moteur et le travail résistant quand le corps pesant gravit la pente, passant de A en B. Les frottements étant négligés le travail moteur est celui de la force $\vec{f}$:

$$\mathcal{T}_m = f.AB$$

Le travail résistant est celui du poids $\vec{P}$ dont le point d'application s'élève de la hauteur HB; soit : $\mathcal{T}_r = -P.HB$

Exprimons le rapport des valeurs absolues :

$$\frac{|\mathcal{T}_m|}{|\mathcal{T}_r|} = \frac{f}{P} \cdot \frac{AB}{HB}.$$

Or la condition d'équilibre reste toujours pratiquement satisfaite; donc :

$$\frac{f}{P} = \frac{BH}{AB}. \text{ Il en résulte :}$$

$$\frac{|\mathcal{T}_m|}{|\mathcal{T}_r|} = 1.$$

Il y a *conservation du travail* dans le plan incliné.

Le plan incliné est donc utile car il permet de déplacer entre deux niveaux horizontaux de lourds fardeaux sans avoir à développer une force excessive, pourvu que l'angle α soit faible.

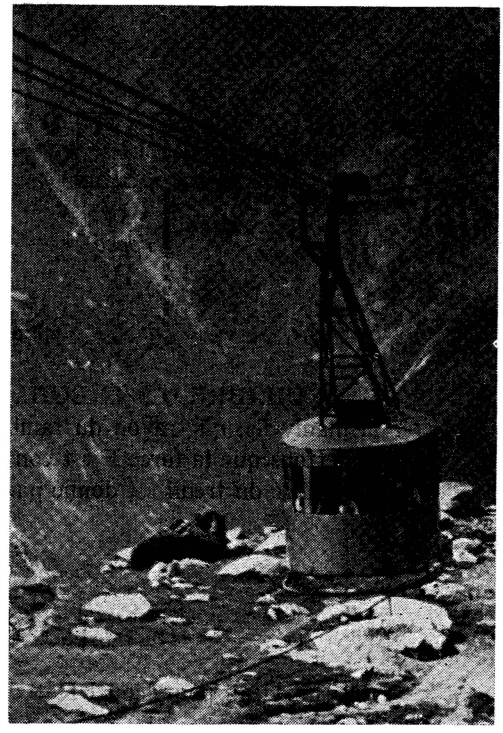


FIG. 26. — *Un téléphérique.*

Utilisé dès l'antiquité par les Égyptiens dans leurs constructions monumentales, le plan incliné a reçu de nombreuses applications : les *rampes* qui permettent aux automobiles d'accéder par leurs propres moyens aux étages supérieurs des garages sont des plans inclinés à forte pente. Les *routes* et les *voies ferrées* en pays accidentés sont des successions de plans inclinés. Les *téléfériques* dérivent du même principe (fig. 26) : un câble transporteur est établi entre deux points d'altitudes très différentes. Sur le câble progresse un chariot au-dessous duquel est suspendue la benne qui contient la charge.

D. LE TREUIL

14. — Le ***treuil*** (fig. 27) comporte un *cylindre* ou *tambour* tournant autour d'un axe OO'; les points O et O' prennent appui sur un *bâti fixe*. Une *manivelle* M actionnée à la main ou au moteur entraîne le tambour dans sa rotation. Un *câble* dont une extrémité *K* est fixée au tambour s'enroule sur ce dernier et permet d'opérer une traction, de soulvere un fardeau, etc.

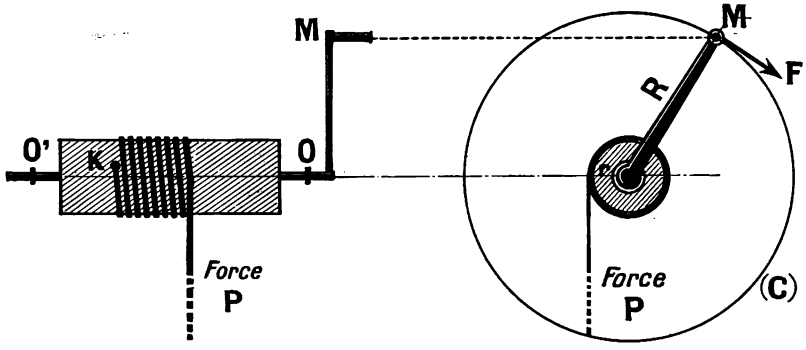


FIG. 27. — *Le treuil.*

15. ÉQUILIBRE DU TREUIL. — Soit R le rayon de la circonférence (C) décrite par la manivelle, *r* le rayon du tambour.

Admettons que la force F est constamment tangente à la circonférence (C).

L'équilibre du treuil est donné par le théorème des moments :

$$F \times R = P \times r$$

d'où

$$F = P \times \frac{r}{R}.$$

Ainsi un treuil pour lequel R = 50 cm et r = 10 cm permettra de maintenir une charge de 100 kg avec une force $F = 100 \times \frac{10}{50} = 20$ kgf.

16. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE (fig. 28). — Sur deux poulies fixes de même axe, solidaires, l'une de rayon r, l'autre de rayon R, sont attachés deux fils qui, partant en sens inverses suivant les tangentes aux deux circonférences, aboutissent à deux dynamomètres D_1 et D_2. Quelles que soient les tractions $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$, pourvu qu'elles soient orthogonales à l'axe O, on constate que l'équilibre s'établit quand les intensités sont dans le rapport

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{R}{r}.$$

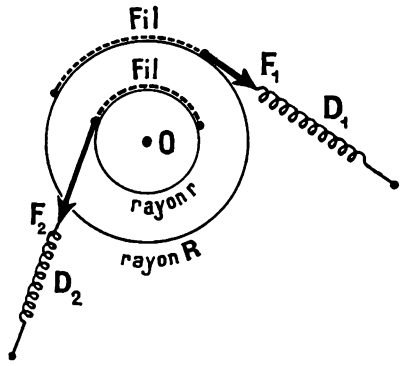


FIG. 28.

17. FORCES SUR LES POINTS D'APPUI. — L'analyse de ces forces, après leur dénombrement, peut être conduite comme pour la poulie fixe, mais elle est moins simple, car, d'une part les deux forces $\vec{F}$ et $\vec{P}$ appliquées au corps mobile ne sont pas, en général, dans le même plan, et, d'autre part, alors que $\vec{P}$ (poids d'un fardeau le plus souvent) reste vertical et constant, $\vec{F}$, au contraire, varie continuellement en direction et même en grandeur.

18. CONSERVATION DU TRAVAIL (fig. 29). — Tous les frottements étant négligés, supposons que la force motrice, tangente à la trajectoire de la manivelle, provoque une rotation du tambour (angle α). A vient en A', B en B'.

Travail moteur : $\mathcal{T}_m = F.\widehat{AA'}$. Travail résistant : $\mathcal{T}_r = -P.\widehat{BB'}$.

Rapport des valeurs absolues :

$$\frac{|\mathcal{T}_m|}{|\mathcal{T}_r|} = \frac{F}{P}.\frac{\widehat{AA'}}{\widehat{BB'}}.$$

Comme les arcs $\widehat{AA'}$ et $\widehat{BB'}$ sont interceptés sur des circonférences de rayon R et r par des angles égaux (α), leur rapport est celui des rayons. Par suite :

$$\frac{|\mathcal{T}_m|}{|\mathcal{T}_r|} = \frac{F}{P}.\frac{R}{r}.$$

Et, en tenant compte de la condition d'équilibre toujours satisfaite :

$$F.R = P.r :$$

$$\frac{|\mathcal{T}_m|}{|\mathcal{T}_r|} = 1.$$

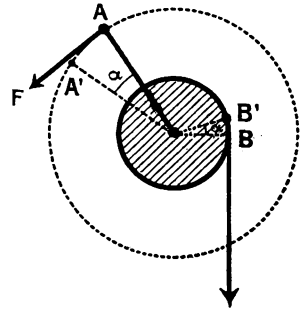


FIG. 29. — *Travail moteur et travail résistant dans le treuil.*

Il y a donc conservation du travail dans le treuil.

Là encore, ce qu'on gagne en force, on le perd en déplacement.

Le treuil est une machine simple très répandue sous des formes très variées : *moulinet* des pêcheurs à la ligne, *pédalier* d'une bicyclette, *treuil des puits*, organe essentiel des *grues* de levage. L'axe du tambour est quelquefois vertical (*cabestan*).

19. MACHINES SIMPLES USUELLES. RENDEMENT. — Les outils ou instruments réellement utilisés présentent deux caractères importants :

1° Ce sont souvent des assemblages de machines simples. — Certaines *pinces* puissantes sont des assemblages de leviers; grâce à des articulations convenablement établies, la force active initiale est transmise aux mâchoires coupantes après plusieurs multiplications successives (fig. 8, p. 142).

Les *grues* utilisent le treuil et la poulie.

Les *palans* sont des assemblages de poulies fixes et mobiles.

La *bicyclette* est un des exemples les plus frappants d'appareil réalisant la combinaison de machines simples : les manivelles des pédales et la roue dentée du pédalier forment un *treuil*. La chaîne passe sur deux *poulies*. Les mâchoires des freins sur jante, les frotteurs des freins-tambour sont commandés par des *tiges-leviers*, reliées par câbles à des *poignées-leviers*. Le succès actuel de la bicyclette est dû en grande partie au changement de vitesse, dont le but est simplement de changer le rayon de la *poulie-roue-libre*, c'est-à-dire en somme de modifier l'effort exercé sur les pédales en même temps que le nombre de tours de celles-ci (conservation du travail). On trouve des *leviers* jusque dans les accessoires eux-mêmes (démonte-pneus, timbre...).

2° Il n'y a pas rigoureusement conservation du travail. — L'étude que nous avons faite des machines simples supposait ces machines parfaites, c'est-à-dire sans frottement. Il en est autrement dans les machines réelles.

a) Prenons l'exemple d'une poulie fixe (fig. 30). Si le fil fin et souple qui chevauche la poulie est tendu par deux corps de même poids P l'équilibre est réalisé, mais on constate qu'il n'est pas détruit même si d'un côté, ou de l'autre, on ajoute une légère surcharge. Cela montre que le passage d'un câble sur une poulie ne permet pas de transmettre *intégralement* une force d'un brin à l'autre.

Proposons-nous de soulever le corps A dans les conditions les plus avantageuses. Pour cela cherchons la surcharge minimum qui, par son poids supplémentaire $\vec{p}$, détermine la montée de A. Quand le centre de gravité de ce corps s'est élevé de la longueur l, le travail résistant de $\vec{P}$, pris en valeur absolue, mesure l'effet *utile* de l'appareil et peut être nommé, pour cela, ***travail utile***. $\mathcal{C}_u$. On a donc :

$$\mathcal{C}_m = \mathcal{C}_{moteur} = (P + p)l$$

$$\mathcal{C}_u = \mathcal{C}_{utile} = P.l$$

On voit ici que : $\mathcal{C}_{utile} < \mathcal{C}_{moteur}$.

Le rapport $\frac{\mathcal{C}_u}{\mathcal{C}_m}$ est appelé ***rendement*** de la poulie. D'une manière très générale, pour toute machine simple fonctionnant dans des conditions pratiques ce rendement est inférieur à l'unité :

$$\text{Rendement} = \frac{\mathcal{C}_u}{\mathcal{C}_m} < 1.$$

b) Pour une machine simple *parfaite* ce rendement serait égal à 1. D'où vient donc la différence?

Il faut en chercher la cause dans les *frottements* inévitables qui s'opposent toujours au mouvement. Pour la poulie ils contrarient la rotation de l'axe sur les tourillons, et l'enroulement ou le déroulement du fil sur la gorge. Il est bien difficile de mieux localiser ces *résistances passives*; on peut seulement dire qu'elles se traduisent globalement par un *couple de frottement* de moment $\mathcal{C}$ dont le vecteur représentatif est perpendiculaire au plan du disque.

c) Si on admet le *Principe de la Conservation du travail mécanique*, qui exige que dans toute machine la somme algébrique de tous les travaux soit nulle, on peut faire entrer avec les travaux résistants le travail des frottements $\mathcal{C}_f$; il en résulte, les lettres désignant les valeurs absolues :

$$\mathcal{C}_{moteur} = \mathcal{C}_{utile} + \mathcal{C}_{frottements}$$

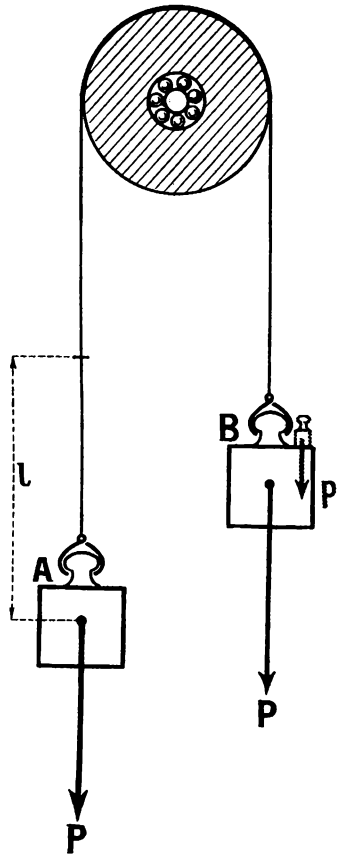


FIG. 30. — *La poulie n'a pas un* ***rendement*** *égal à l'unité.*

L'expression du rendement prend alors la forme suivante :

$$\underset{(\textit{machine réelle})}{\text{Rendement}} = \frac{\mathcal{C}_u}{\mathcal{C}_m} = \frac{\mathcal{C}_m - \mathcal{C}_f}{\mathcal{C}_m} = 1 - \frac{\mathcal{C}_f}{\mathcal{C}_m}.$$

Pour s'approcher des conditions idéales de fonctionnement d'une machine parfaite (Rendement = 1), il faut diminuer le terme $\frac{\mathcal{C}_f}{\mathcal{C}_m}$.

On y parvient en réduisant les frottements, notamment par l'emploi de *roulements à billes* (fig. 31), et par un graissage convenable des différents organes en mouvement.

Le rendement d'une bonne bicyclette est voisin de **0,7.**

Cette notion de *rendement*, très importante, se retrouvera souvent dans le *Cours de Physique*. Dès maintenant, il faut bien retenir qu'un moteur quelconque ***ne peut fournir en travail plus qu'il ne reçoit.*** Les machines ne créent pas du travail, elles ne font que le transformer et, dans les machines réelles que peuvent construire les hommes, cette transformation se fait toujours avec perte. Le but des recherches physiques et mécaniques, dans ce domaine, est précisément d'obtenir un rendement le plus possible voisin de l'unité.

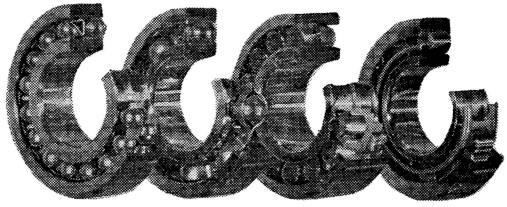


FIG. 31. — *Les roulements à billes ou à rouleaux réduisent les frottements et améliorent le rendement des machines.*

EXERCICES

1. A l'extrémité A d'une règle de poids négligeable, de longueur 50 cm, s'exerce une force de 150 gf. Quelle force, parallèle à la précédente, doit-on exercer à l'autre extrémité B pour maintenir la règle en équilibre si le point d'appui est à 5 cm de A? Rép. : 16,67 gf.

2. Même question que ci-dessus, la règle pèse 20 gf. Rép. : 7,78 gf.

3. Reconnaître, dans le fonctionnement normal des appareils ci-après, le genre des leviers :

Casse-noix, cisailles, rame de bateau, « diable » (pour le transport des sacs), poignée de frein de bicyclette, marteau arrache-pointe, démonte-pneu (au démontage, au remontage), pincettes, étau, porte-plume.

4. Examiner a pédale d'une machine à coudre (fig. 32). Quels genres de levier emploie-t-on quand on s'en sert? L'axe partage-t-il le plateau en deux surfaces égales? Chercher une explication.

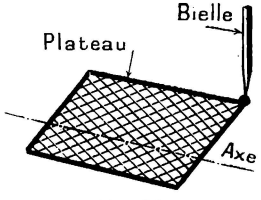


FIG. 32.

5. Établir la conservation du travail dans un levier du 2e genre.

6. Dans une brouette la distance entre l'axe de la roue et la poignée est 1,2 m. La charge qui pèse 60 kgf s'exerce à 40 cm de l'axe. Quelle est la force supportée par le sol? (On ne tient pas compte du poids de la brouette). Rép. : 40 kgf.

7. 1° Quelle force appliquer en C (fig. 33) pour maintenir l'équilibre (négliger le poids de la poulie A)?

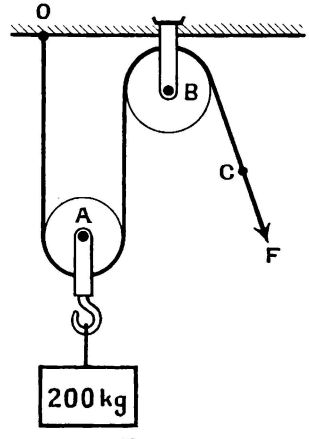


FIG. 33.

2° Si C se déplace de 20 cm, quel est le déplacement de A?

3° La poulie A pèse 10 kgf. Les frottements équivalent à une force de 25 kgf. Quel est le rendement de l'appareil?

4° Quel avantage aurait-on à faire passer la corde sur une autre poulie mobile A′ puis sur une autre poulie fixe B′, A et A′ ayant leurs axes solidaires? Généraliser.

Rép. : 100 kgf; 10 cm; Rendement $\simeq$ 0,77.

8. On dispose du montage ci-contre (fig. 34). La sphère S pèse 40 kgf. Le plan est incliné à 45°. La tige AB est rectiligne, horizontale, pèse 5 kgf et mesure 1 m. Le point A est fixe.

On applique verticalement en C une force de 30 kgf et le système reste en équilibre.

1° Calculer la réaction du plan au point K.

2° Calculer la distance AC = x.

Rép. : R = 28,28 kgf; x = 85,9 cm.

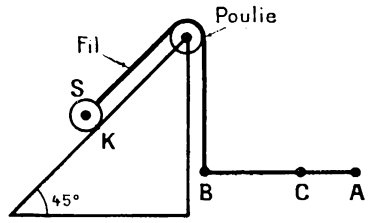


FIG. 34.

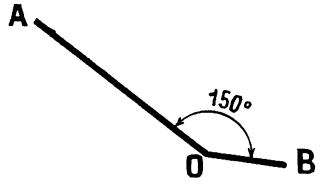
9. Un train pesant 400 000 kgf est remorqué sur une rampe à 2 °/₀₀. Quelle force de traction exerce la locomotive? Quelle est sa puissance si la vitesse est 72 km/h? Rép. : 800 kgf; 213 ch.

10. Un moteur électrique consommant une puissance de 3 kW et de rendement 0,9 entraîne une machine-outil par l'intermédiaire d'un jeu de poulies dont le rendement est 80 °/₀. Quelle est en *ch* la puissance utilisée par la machine-outil?

Rép. : 2,9 ch.

PROBLÈMES

1. Un levier est constitué par une tige, homogène, de section constante AOB faisant en O un angle de 150°. Il peut tourner autour de l'axe O supposé fixe, horizontal, perpendiculaire au plan AOB. On donne : AO = 80 cm; BO = 20 cm. Le poids du levier (500 gf) sera négligé dans les 2 premières parties du problème.



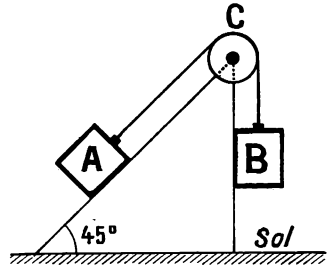
1° OB est horizontal; on applique en B un poids de 40 kgf. Quelle force verticale F_1 faut-il exercer en A pour que B se soulève?

2° OA et OB font des angles égaux avec la verticale de O. Quel est le rapport des poids P_A et P_B, appliqués respectivement en A et B, qui réalisent l'équilibre? Sachant que le point d'appui supporte une force de 60 kgf calculer P_A et P_B.

3° OA est horizontal. Quelle force F_2, verticale, faut-il appliquer en B pour que A soit soulevé? Quel est, en joules, le travail de cette force quand OB est parvenu à la position horizontale?

Prendre $\sqrt{3}$ = 1,73.

2. Un objet A, de poids 1 000 newtons, peut glisser sur un plan incliné à 45° sur l'horizon. Il est maintenu immobile par la traction d'un câble, de poids négligeable, passant sur une poulie fixe C de rayon 10 cm et soutenant un autre objet B. Les points les plus bas de A et B sont à deux mètres au-dessus du sol horizontal; entre A et C le câble est parallèle à la ligne de plus grande pente du plan incliné.



1° En négligeant les frottements de A et de B sur le plan incliné et ceux de la poulie calculer le poids de B.

2° On coupe le câble. Évaluer les travaux mis en jeu dans la chute des deux objets jusqu'au sol : *a*) en joules; *b*) en kilogrammètres

3° Pour remonter A à son altitude initiale on adapte à la poulie une manivelle de longueur 45 cm. On soulève alors A en appliquant à l'extrémité de cette manivelle une force

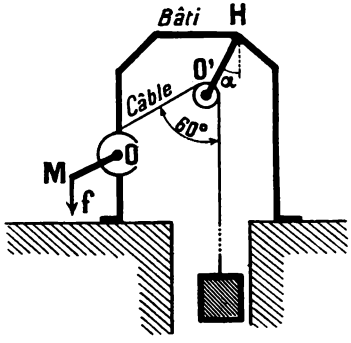
verticale *minimum* égale à 162,5 newtons. — Quelle est la force de frottement, supposée parallèle à la ligne de plus grande pente du plan incliné qui contrarie le mouvement de A?

4° L'opérateur développant alors une puissance de 0,1 ch, combien de temps lui faudra-t-il pour soulever A à 2 mètres au-dessus du sol si l'on tient compte des frottements?

5° Quel serait le rendement d'un moteur, empruntant au secteur électrique une puissance de 0,20 kW, capable d'effectuer le même travail en un temps deux fois moindre?

Pour tout le problème, prendre $\sqrt{2} = 1{,}4$.

3. Pour exploiter un puits on utilise le dispositif représenté par la figure. Sur un treuil d'axe O horizontal, dont la manivelle OM a une longueur de 60 cm, et le tambour un diamètre de 20 cm s'enroule un câble qui passe sur une poulie fixe, d'axe horizontal O′ attachée au bâti par un support rectiligne O′H articulé au point H. Le poids du fardeau est 200 kgf; l'angle des deux brins du câble : 60°. La manivelle étant parallèle à la partie oblique du câble, on maintient le dispositif en équilibre en exerçant en M une force verticale $\vec{f}$.



1° En négligeant tous les frottements ainsi que le poids des appareils de levage et du câble, calculer :

a) l'intensité de la force $\vec{f}$;

b) l'angle α que fait le support O′H avec la verticale;

c) la traction supportée par le point H du bâti.

2° Un moteur qui peut actionner le treuil soulève le fardeau régulièrement de 25 cm par seconde. Sachant que le rendement de l'ensemble treuil-poulie est de 60 % calculer :

a) la puissance du moteur (en ch et kW);

b) le moment du couple qu'il exerce sur le tambour du treuil.

4. Un treuil possède les caractéristiques suivantes :

Rayon du tambour : 8 cm.

Longueur de la manivelle : 32 cm.

Poids du fardeau suspendu à la corde : 48 kgf.

1° Le poids de la corde est négligeable. Calculer :

a) quelle force verticale on doit appliquer à l'extrémité de la manivelle horizontale pour réaliser l'équilibre du tambour;

b) l'intensité que prend la force précédente quand la manivelle fait un angle de 60° avec la verticale;

c) le travail effectué quand le fardeau est soulevé de 12 mètres;

d) la puissance moyenne (en ch et en kW) pendant cette opération, qui a duré 20 secondes.

2° La corde a une longueur de 16 mètres et pèse 4 kgf. Le fardeau a initialement son centre de gravité à 14 mètres au-dessous du plan horizontal contenant l'axe du treuil et la corde est tendue. On soulève lentement le fardeau en exerçant à l'extrémité de la manivelle une force $\vec{F}$ constamment tangente à la circonférence décrite par ce point :

a) Montrer que cette force varie, pendant l'ascension, entre deux limites qu'on précisera.

b) Exprimer l'intensité F en fonction de la distance x parcourue par le centre de gravité du fardeau pendant sa montée.

c) Tracer le graphique des variations de F (ordonnées) en fonction de x (abscisses).

d) Calculer en joules et en kilogrammètres, le travail, nécessaire pour élever le fardeau de 12 mètres. Montrer comment ce travail est représenté simplement à l'aide du graphique précédent.

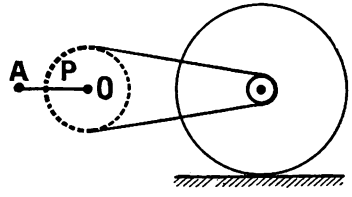
5. Une bicyclette possède les caractéristiques suivantes (fig.) :

Rayon OP du pédalier : R = 10 cm.

Rayon de la roue libre : r = 4 cm.

Diamètre des roues : D = 60 cm.

Longueur de la manivelle de la pédale : OA = l = 16 cm.



1° La manivelle étant horizontale, un cycliste, pesant 60 kgf appuie de tout son poids en A et la machine n'avance pas. Déterminer le sens et la grandeur de la force F, supposée tangente à la roue, qui s'oppose au démarrage. Quelle est la valeur de la tension T de la chaîne?

2° Le cycliste fait, en palier, une promenade de 20 km. On admet qu'il fournit, alternativement, l'effort du paragraphe précédent, sur chaque pédale, pendant $\frac{1}{40}$ de tour.

a) calculer, en kilogrammètres, et en joules le travail effectué pendant la promenade.

b) Sachant que la promenade a duré une heure, quelle a été la puissance moyenne développée, en chevaux-vapeur et en kilowatts?

3° Pour franchir un col, le cycliste partant de l'altitude 400 mètres doit pédaler pendant 10 kilomètres. Le travail dépensé pour cette ascension est 3 fois plus important que pour la promenade précédente. Quelle est l'altitude du col sachant que les frottements de toutes sortes absorbent le même travail en plat et en montée?

Poids de la machine : 15 kgf.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 10. Machines simples (Poulies et plan incliné).

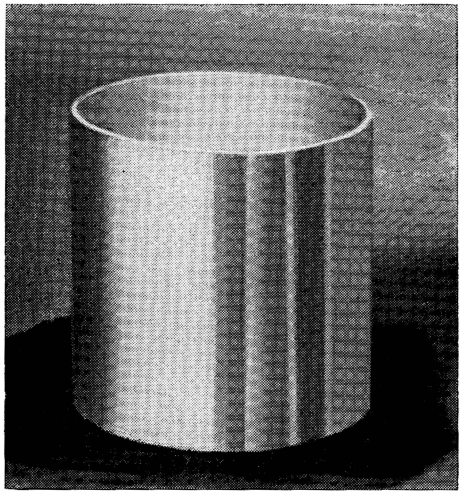


Photo. Bureau International des Poids et Mesures. (cylindre en grandeur naturelle).

FIG. 1. — *Le cylindre étalon international. Sa masse, le* ***kilogramme****, représente l'unité de masse dans le système moderne M. K. S. (mètre, kilogramme seconde).*

8. NOTION DE MASSE

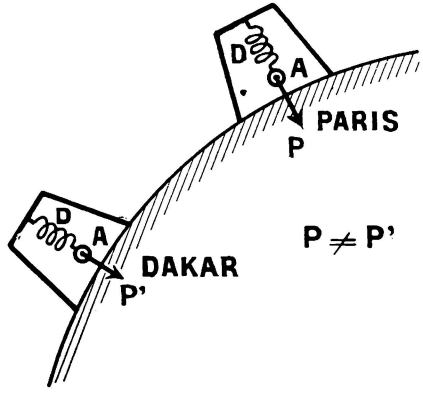


FIG. 2. — *Le poids d'un même corps dépend du lieu où il se trouve.*

1. LE POIDS D'UN MÊME CORPS VARIE AVEC LE LIEU OU ON LE MESURE. — Soit un dynamomètre *D*, mesurant le poids d'un corps *A* à **Paris** (fig. 2). Imaginons de transporter *A* et *D* en quelqu'autre endroit, à **Dakar,** par exemple, pour effectuer la même mesure. Le résultat est différent : l'allongement du ressort est un peu plus *faible.* Le poids de *A* a donc varié. Le dynamomètre, supposé étalonné à Paris, montre qu'un poids de 1 kilogramme-force à Paris devient 0,998 kgf à Dakar. A Paris même, si nous disposions d'un dynamomètre assez sensible, nous

pourrions constater que l'objet *A* n'a pas exactement le même poids au pied et au sommet de la Tour Eiffel. Donc :

Le poids d'un même objet, mesuré au dynamomètre, dépend du lieu où on le mesure.

A quoi est dû ce changement du poids? Est-il particulier au corps envisagé? Dépend-il de son volume?... A toutes ces questions des expériences permettent de répondre. Sans préciser comment ont pu être faites les mesures, nous nous contenterons d'en rassembler les résultats.

2. CHAMP DE LA PESANTEUR. — Supposons maintenant que *différents* objets *A*, *B*, *C*,... pour lesquels un dynamomètre indique, à **Paris**, les poids P_A, P_B, P_C, ..., soient transportés à **Dakar.** En cette nouvelle station le dynamomètre indique de nouveaux poids P'_A, P'_B, P'_C.... Mais une remarque essentielle peut être faite : si le poids de A a été multiplié, par exemple, par le nombre 0,998, il *en est de même pour les poids de B et de C*..., car toutes les indications du dynamomètre se trouvent modifiées dans le même rapport. On a donc (fig. 3) :

$$\frac{P'_A}{P_A} = \frac{P'_B}{P_B} = \frac{P'_C}{P_C} = \ldots = \text{constante.}$$

Le facteur de multiplication qui modifie les poids des objets quand on les déplace d'un point à un autre est donc le même pour tous les corps. Indépendant du corps qui subit le déplacement il ne dépend que des lieux où s'effectue la mesure . *L'altération du poids doit donc être attribuée à la Terre.*

Avec un autre langage, on traduit ce fait en disant que la Terre exerce, en chaque point autour d'elle, un ***champ de pesanteur***, variable avec ce point, c'est-à-dire dépendant de sa position géographique et de son altitude. Pour pouvoir représenter cette influence de la Terre par un *nombre*, on convient de dire que *les intensités du champ de la pesanteur en différents points sont proportionnelles aux différents poids que prend un* ***même corps*** *transporté en ces points.* On pose donc, par définition :

G proportionnel à **P**

intensité du champ de pesanteur — poids d'un même corps.

Ce qui peut se traduire par :

$$\frac{G}{P} = \text{constante.}$$

—→ *La valeur de* ***G*** *dépend de la* ***latitude.*** Toutefois ses variations en fonction de la latitude restent faibles : 5/1 000 environ, en valeur relative quand on passe du Pôle à l'Équateur (où ***G*** est plus faible).

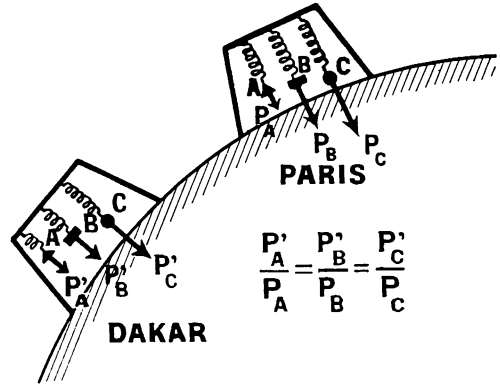


FIG. 3. — *D'un lieu à un autre les poids de tous les corps sont modifiés suivant le même rapport.*

⟶ *La valeur de G dépend de l'**altitude.*** Tant qu'on ne s'éloigne pas trop du sol, les variations enregistrées restent très faibles : 1/10 000 environ en valeur relative quand on passe de la base au sommet de la Tour Eiffel (où G est plus faible). Mais à très haute altitude les variations, par rapport aux valeurs à l'altitude zéro, peuvent devenir très sensibles. Les récents satellites artificiels de la Terre voyagent dans des régions de l'espace ou l'intensité de ***G*** n'est que les 8/10 de sa valeur moyenne au sol.

Ces résultats sont schématisés, sur la figure 4, par différentes grandeurs données à la lettre ***G.***

En somme le champ de pesanteur présente une intensité constante dans une région assez étendue, comme l'emplacement d'une ville, par exemple.

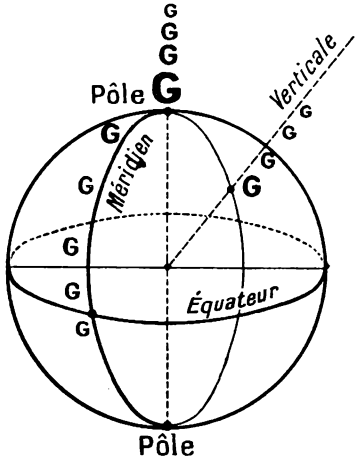


FIG. 4. — *Distribution de l'intensité du champ de la pesanteur au voisinage de la Terre.*

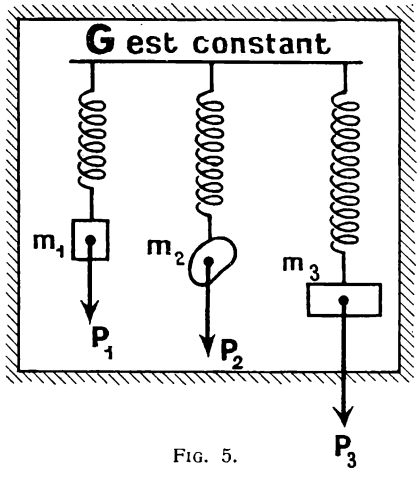


FIG. 5.

3. MASSE D'UN CORPS. — Plaçons nous donc en un lieu (fig. 5) donné; l'intensité du champ de la pesanteur y est *la même* pour tous les objets. Or différents corps ont, en ce lieu, des poids différents. Il faut donc admettre que le poids d'un objet dépend d'un facteur caractérisant cet objet et lui seul. On désigne ce facteur par le nom de **masse** et, pour représenter les masses par des nombres, on convient que *les masses de différents corps sont proportionnelles aux poids de ces corps, mesurés **au même lieu.***

Si P_1, P_2, P_3, ... sont les poids, mesurés au même lieu, de corps [1], [2], [3], ... (fig. 5) et m_1, m_2, m_3 leurs masses.

$$\frac{P_1}{m_1} = \frac{P_2}{m_2} = \frac{P_3}{m_3} = \textbf{\textit{constante}}$$

4. RELATION ENTRE LE POIDS ET LA MASSE D'UN MÊME CORPS. — Nous avons montré que :

a) Pour un *même corps* en *différents lieux*

$$\frac{P}{G} = \text{constante}$$

b) Pour *différents corps en un même lieu*

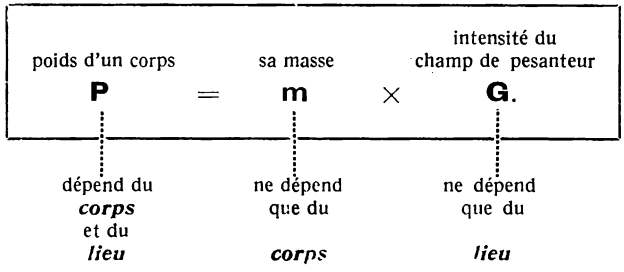
$$\frac{P}{m} = \text{constante}$$

On peut résumer en groupant dans une

seule relation l'influence de la *Terre* (par le terme ***G***) et celle du *corps* (par le terme ***m)*** pour donner à la force attractive ***P*** sa valeur; en introduisant un facteur de proportionnalité k :

$$P = k.m.G.$$

On rend la formule plus simple en *donnant à* ***k*** *la valeur* 1 ; cela revient à choisir correctement des unités pour *P*, *m*, *G*. Dans ce cas :



REMARQUES :

1. Conservation de la masse. — Dans tout ce qui précède, l'expression « *le même corps* » signifie qu'on n'a rien ajouté ni rien retranché à l'objet dont on parle. La matière qui le constitue est donc restée la même : *la masse d'un corps est invariable si on ne lui ajoute (ou supprime) aucune particule matérielle.* Nous sommes donc amenés à considérer comme équivalents les termes « masse » et « quantité de matière ». La relation entre les deux notions, qui sera mieux comprise plus tard, restera pour le moment intuitive. Il faudrait en tout cas se garder de rapprocher *masse* et *volume.* On ne peut, en effet, comparer les masses de deux corps *A* et *B* en comparant leurs volumes que si d'une part *A* et *B* sont l'un et l'autre homogènes (chacun d'eux a même composition en tous ses points) et si, d'autre part, on est renseigné sur la constitution intime des atomes qui, par leurs assemblages plus ou moins condensés et encombrants, forment ces deux corps. Prenons un cas extrême : la mesure des *poids* d'une balle de tennis et d'une sphère en plomb de même diamètre ne permet évidemment pas de douter de la différence de leurs *masses*, malgré l'égalité de leurs volumes.

2. Comparaison des masses. — En un même lieu la comparaison des masses peut se faire en comparant les poids des objets. La mesure d'une masse se ramène donc à une mesure de *force* et on peut utiliser un dynamomètre; mais nous verrons que si on désire une grande précision, l'appareil à employer est *la balance*, incomparablement plus sensible et plus fidèle.

3. Nature vectorielle du poids; nature scalaire de la masse. — Quand, à **Paris,** le charbonnier gravit un étage avec un sac de charbon sur le dos, c'est le ***poids*** du charbon qui l'intéresse, car il doit lui opposer son effort musculaire. Il sait bien qu'il s'agit là d'une ***force,*** et il a conscience d'une *intensité* (grandeur), d'une *direction* (verticale), d'un *sens* (vers le bas). Quand le charbon est livré, le client, lui, ne s'intéresse qu'à la ***masse.*** Ce qui importe en effet, pour lui, c'est que chaque parcelle de la matière achetée donne une certaine quantité de chaleur. Pour lui, la capacité d'utilisation du charbon reçu se traduit par un simple *nombre*, qui n'implique *ni direction, ni sens.*

A **Dakar,** le même sac de charbon pèserait un peu moins lourd aux épaules du charbonnier (*poids* plus faible), mais le client aurait reçu la même valeur utile de combustible (même *masse*).

Un poids est une force, donc une grandeur ***vectorielle.***

Une masse ne demande pas d'être représentée par un vecteur, puisqu'un nombre suffit pour la classer dans une échelle de comparaison et de mesure; on dit que c'est une grandeur ***scalaire.***

5. UNITÉS DE MASSE. — Les poids sont mesurés en unités de force; pour exprimer une grandeur nouvelle comme la masse, il faut des unités nouvelles. Voici les unités; elles dérivent de l'unité fondamentale : le kilogramme.

— ***le kilogramme (kg). Le kilogramme est la masse du cylindre international.***

— *le* ***gramme (g)*** *: c'est la millième partie du kilogramme.*

— *la* ***tonne (t)*** *: une tonne vaut* 1 000 *kilogrammes.*

La correspondance entre les unités de masse et les unités de poids obéit à la formule de liaison P = m . G. Nous retiendro s eulement la convention suivante entre les unités :

Une masse de 1 kilogramme possède à Paris un poids de	**1 kilogramme-force ou 9,81 newtons.**

Par conséquent :

1. Une *masse de* 1 *g* possède à Paris un *poids de* 1 *gf ou* 0,00981 *N.*

2. Comme nous avons rattaché la dyne au newton par : 1 N = 10^5 dynes : une *masse de* 1 *g* possède à Paris un *poids de* 981 *dynes.*

EXERCICES

1. L'intensité du champ de pesanteur, évaluée avec la même unité, possède les valeurs numériques suivantes :

à Paris : 980,97
à Brazzaville : 978,04
au Pôle : 983.

Quel serait, en kilogrammes-force et en newtons le poids du cylindre international si on le transportait à Brazzaville, au Pôle?

2. Un élève dit : *« je pèse 52 kilos »*, ... *« prête-moi un poids de 100 grammes »*, ... *« un dé à coudre contient 3,5 g d eau »*, ... *« ce train emporte 100 tonnes de blé et sa locomotive exerce sur les wagons une puissance de 7 tonnes »*, ... *« 5 kgf de sucre valent 600 francs »*.... Rectifiez les expressions qui vous semblent incorrectes.

3. Un ouvrier soulève verticalement un sac pesant 3 [(kg) (kgf)] et contenant 30 [(kg) (kgf)] de ciment, à l'aide d'une corde sur laquelle il exerce une traction de .... Placée sur une brouette, cette charge de ... l'oblige à produire sur les poignées un effort de 12 .... Avec une quantité Q[(gf), (g)] de charbon on peut chauffer [(*P* gf) (*m* g)] d'eau et en vaporiser le 1/3, soit ....

Choisir pour ce texte les unités convenables et compléter.

4. Rectifier ces textes :
Une grue de levage exerce une puissance de 20 tonnes.
La teneur de ce minerai est de 20 [(gf) (g)] par m³....
Ce câble présente une charge de rupture de 50 kgmm²

5. Indiquer les différentes unités qui pourraient convenir pour mesurer l'intensité du champ de la pesanteur; former leurs abréviations.

6. La diminution relative de [*masse*], [*poids*] (rectifiez!) d'un objet quand on passe de l'altitude O à l'altitude Z en un point de même latitude est $\frac{2Z}{R}$ (R = rayon terrestre : 6 400 km). Quelle est en [*newtons*] [*kg*] la perte de [*masse*] [*poids*] que subit un corps de masse 50 grammes quand on le transporte du pied au sommet de la Tour Eiffel dont la hauteur est 300 mètres?

7. Deux objets suspendus successivement au même dynamomètre, à *Paris*, provoquent le même allongement : *a* . Qu'y aurait-il de changé si on répétait l'expérience, à *Brazzaville*, avec les mêmes objets et le même dynamomètre?

8. Associer à chacun des mots suivants : *force*, *puissance*, *longueur*, *masse*, *tension*, *temps*, *effort*, *moment*, *aire*, *capacité*, *travail*, *traction*, *poids*, ... certaines abréviations prises dans la liste : *kgm*, *N*, *erg*, *kW*, *kW-h*, *cm*, *g*, *s*, *kg*, *cm.dyne*, *t*, *J*, *m³*, *gf*, *cm²*, *m.N*.

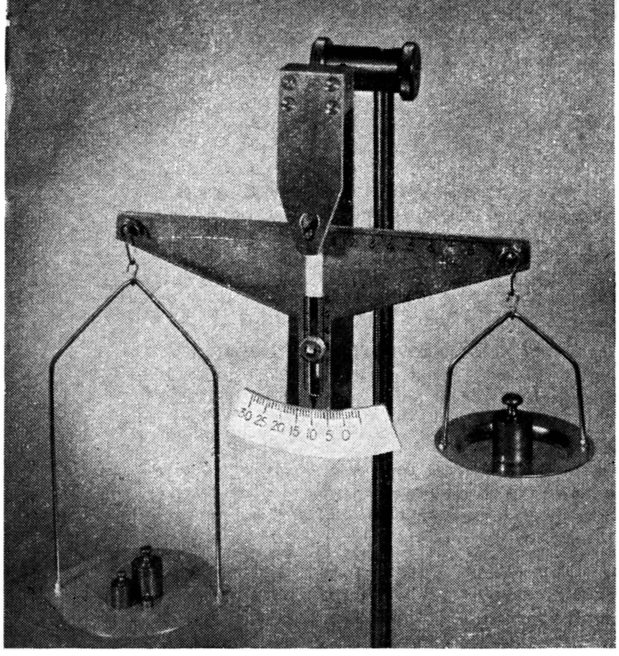


Photo Hatier.

FIG. 1. — **Balance d'étude et de Travaux pratiques.**

FIG. 2. — **Recherche du centre de gravité du fléau.** *Les deux masses mobiles prenant différentes positions, on mesure directement, dans chaque cas, sur une graduation, la distance du centre de gravité au couteau central.*

FIG. 3. — *Une boîte de* ***masses marquées*** *de précision. La plaque de verre recouvre les masses en lamelles dans leur écrin. Tous les masses se manœuvrent à l'aide de la pince.*

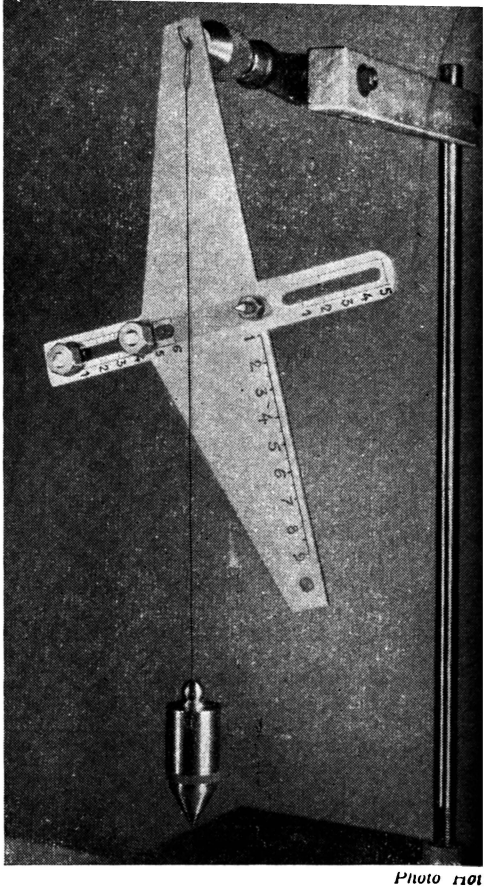
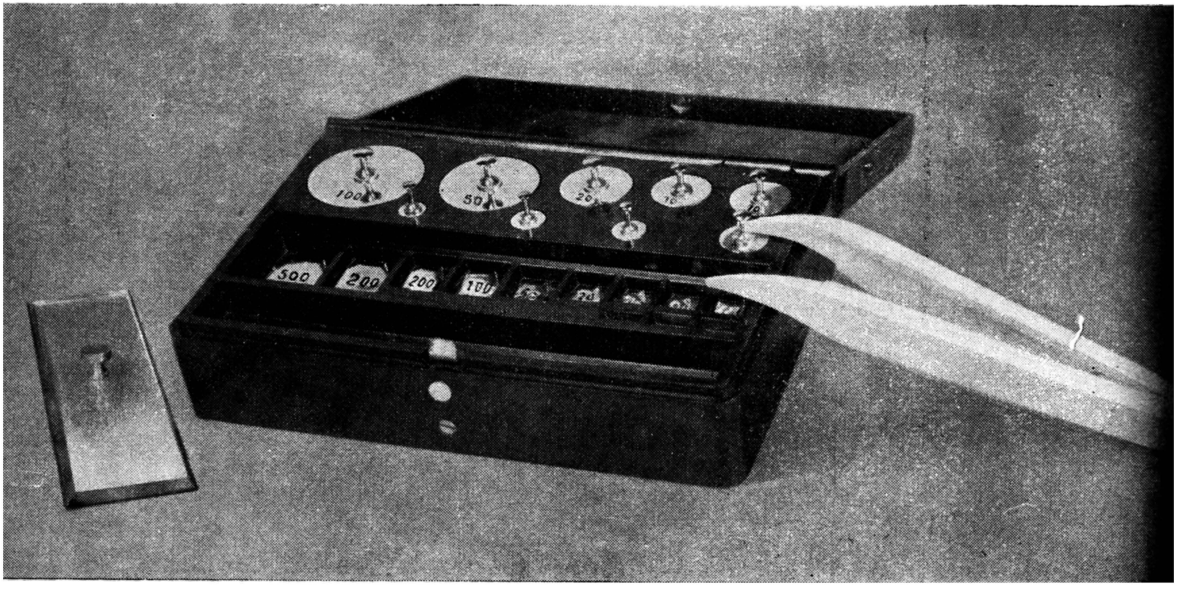


Photo Hat

FIG. 2.

FIG. 3.

Photo Hatier.



9. LA BALANCE

LES PESÉES

D'après le programme de la classe, **l'usage de la balance, la définition pratique et l'étude expérimentale de ses qualités ne seront étudiés qu'en Travaux pratiques.** *Il nous a semblé cependant utile que l'élève puisse retrouver dans son livre la justification raisonnée indispensable des gestes qu'il sera appelé à effectuer : analyse de la composition d'une boîte de masses marquées, nécessité des doubles pesées, etc.... La description d'une balance de précision peut aussi l'aider à mieux se convaincre de l'importance de cet instrument fondamental, et, par suite, à respecter tout appareil de qualité, même simple, mis entre ses mains.*

Le chapitre peut donc faire l'objet d'une lecture accompagnant les séances de Travaux pratiques, ou servir de guide pendant des séances de Cours avec manipulations intégrées. On pourra n'en retenir formellement que les définitions et les conseils relatifs aux pesées.

1. La ***balance*** sert à mesurer des *forces*, mais son emploi est généralement limité à la mesure des forces verticales et, plus particulièrement des *poids*. Comme, en un lieu déterminé, les poids des objets sont proportionnels à leurs masses, la balance est presque toujours utilisée à la comparaison et à la ***mesure des masses.***

Nous nous proposons de découvrir les *qualités d'une balance de précision* et, en même temps, de faire l'*apprentissage des pesées.* Nous verrons ensuite comment sont construites certaines balances usuelles.

A. DESCRIPTION. SIMPLE PESÉE

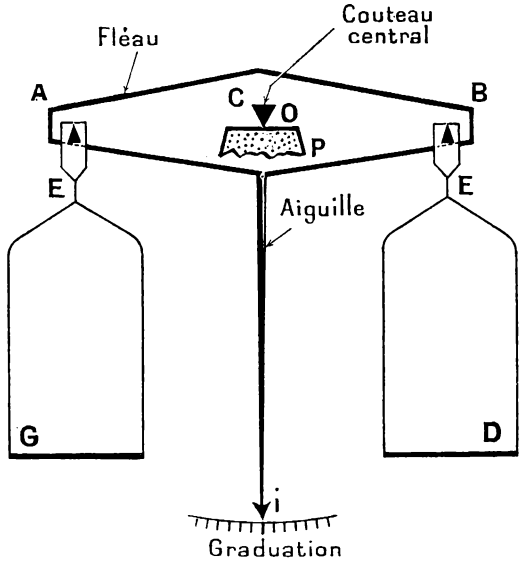


FIG. 4. — *Les éléments d'une balance.*

2. DESCRIPTION. — Une balance comporte toujours les éléments suivants (fig. 4) :

Le **fléau** est une *tige métallique rigide légère*, le plus souvent *symétrique*.

Au voisinage de son centre il porte un petit prisme d'acier dont une arête vive O est tournée vers le bas : c'est le **couteau central C.** L'arête O repose sur un plan horizontal P, très dur, lié au socle de la balance, qui sert de **support** au fléau. Ce dernier peut donc osciller autour de l'axe horizontal O.

Symétriquement par rapport à O sont placées les arêtes vives A et B, horizontales, tournées vers le haut, de deux **couteaux latéraux.** Les axes A, O, B sont donc dans un *même plan* : ils sont de plus *parallèles*. Les couteaux latéraux soutiennent, par l'intermédiaire de deux **étriers** E, deux **plateaux** G et D.

Quand le fléau oscille, il entraîne une **aiguille** longue et fine dont la pointe ***i*** décrit un arc de circonférence de centre O. Cet index se déplace devant une **graduation** circulaire fixée au socle.

Les plateaux étant vides, la balance au repos prend une position d'équilibre stable telle que le centre de gravité de l'ensemble mobile se trouve au-dessous de l'axe O, le plus bas possible. La pointe de l'aiguille vient alors se placer devant une division du cadran gradué. Soit ***n*** cette division (1).

---

(1) On appelle parfois cette division : « le zéro ». Nous verrons (T. P.) qu'il n'est pas avantageux que cette division soit numérotée : *zéro.*

3. BOITES DE MASSES MARQUÉES. — *Peser* un corps, c'est constater que sa masse est égale à la somme de plusieurs masses déjà connues. Il faut pour cela, posséder une collection d'objets dont les masses ont été rigoureusement déterminées par comparaison avec le kilogramme, masse-étalon du cylindre international conservé au B. I. P. M; c'est ce qu'on nomme une collection de *masses marquées* (1).

a) De 50 kg à 50 g, on dispose de blocs de *fonte* en forme de tronc de pyramide (fig. 5).

b) De 5 kg à 1 g, on utilise en général des cylindres en *laiton* ou en *acier inoxydable* (fig. 6) rassemblés en boîtes dites *boîtes de masses marquées.* Voici la composition d'une boîte dans laquelle la masse la plus élevée est 500 g, la plus faible 1 g :

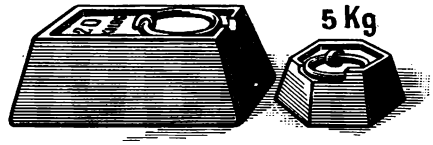


FIG. 5. — *Masses marquées en fonte.*

500 g	200 g	100 g	100 g
50 g	20 g	10 g	10 g
5 g	2 g	2 g	1 g

c) Pour les masses inférieures au gramme, on construit des *lamelles* de platine, acier inoxydable, bronze ou aluminium, appelées *masses divisionnaires* du gramme (fig. 7). Voici la série de ces masses formant une boîte de 500 mg à 1 mg :

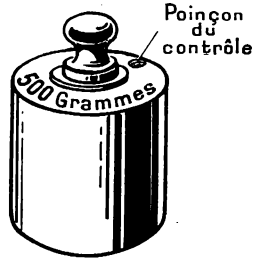


FIG. 6. — *Masses marquées en laiton.*

500 mg	200 mg	100 mg	100 mg
50 mg	20 mg	10 mg	10 mg
5 mg	2 mg	2 mg	1 mg

La figure 3 représente une boîte-écrin contenant ces objets marqués et la pince qui sert à les manipuler.

FIG. 7 — *Masses marquées en aluminium*

(1) On devrait dire, plus rigoureusement : *collection d'objets marqués.* — Chacun de ces objets possède une *masse* et un *poids.* Mais, ici, seule la masse présente un caractère important. On peut alors très bien admettre le terme *collection de masses marquées.* D'ailleurs la *marque* portée par chacun des objets est bien exactement sa *masse.*

Les masses qui composent une boîte n'ont pas été choisies au hasard. On remarquera, en examinant les séries précédentes, quelques propriétés :

1° Avec un nombre relativement très faible [24], on peut réaliser un *très grand nombre de combinaisons* : toutes les masses, de milligramme en milligramme, de 1 mg à 1 001 000 mg, soit autant de combinaisons que la somme de toutes les masses.

2° Chacune des masses marquées peut être réalisée en choisissant dans la boîte un certain nombre de masses *inférieures*. Exemple : une masse de 50 g peut être réalisée avec (20 + 10 + 10 + 5 + 2 + 2 + 1) g.

4. SIMPLE PESÉE. — Proposons-nous de peser un corps de masse inconnue ***x***. Nous le plaçons sur un des plateaux d'une balance et, en plaçant des masses marquées convenables dans l'autre plateau, nous ramenons l'aiguille devant la

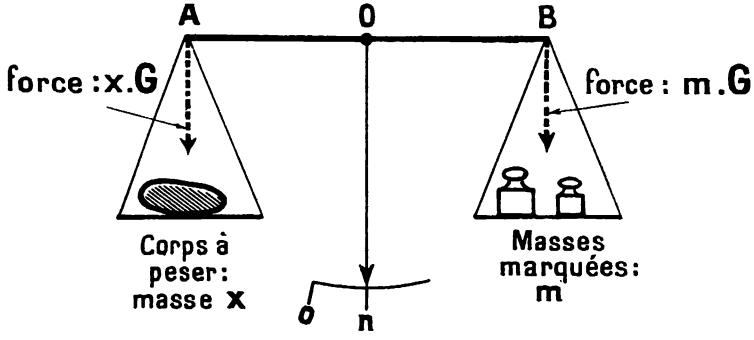


FIG. 8. — *Simple pesée.*

division *n* qui marquait l'équilibre du fléau à vide (fig. 8). Si ***m*** désigne la somme des masses marquées et *G* l'intensité de la pesanteur au lieu de l'expérience, les poids sont respectivement : pour l'objet : $x.G$ et pour les masses marquées $m.G$.

Le théorème des moments, appliqué à l'équilibre du fléau, s'écrit :

$$x.G.OA = m.G.OB$$

Soit :

$$x.OA = m.OB, \qquad [1]$$

et si, par construction, OA = OB,

$$\boxed{x = m.}$$

La simple pesée permet donc, par une opération rapide, de constater l'*égalité de deux masses*. Nous allons voir cependant qu'elle ne peut convenir pour des pesées précises. Elle est toujours employée dans le commerce, jamais au laboratoire.

B. LES QUALITÉS D'UNE BALANCE

5. JUSTESSE. DOUBLE PESÉE.

DÉFINITION PRATIQUE : ***Une balance est dite juste si, des masses égales étant placées simultanément dans les deux plateaux, le fléau conserve sa position d'équilibre à vide.***

CONDITION. — Soient *a* et *b* deux masses égales. La condition d'équilibre du fléau, établie en [1], étant satisfaite, on doit avoir (fig. 8 et 9) :

$$a.OA = b.OB$$

Donc : *OA doit être égal à OB.* Pour qu'une balance soit juste il faut que les deux bras du fléau soient *égaux.* A cette seule condition la simple pesée est une opération correcte.

CONTRÔLE. — Deux masses rigoureusement égales placées sur les deux plateaux ne doivent pas modifier l'équilibre. Mais, malgré tout le soin apporté par les constructeurs à ajuster des masses marquées à des valeurs égales, lorsqu'on veut éprouver la justesse d'une *balance de précision,* on peut craindre entre les objets choisis dans la boîte une très légère inégalité des masses à laquelle la balance serait insensible. Aussi opère-t-on de la façon suivante (fig. 9) :

1. On repère la position d'équilibre *à vide* en notant la division ***n*** devant laquelle s'immobilise l'aiguille.

2. On charge l'un des plateaux d'un corps quelconque, qui peut être, avantageusement, un *objet marqué* pris dans une boîte. En plaçant sur l'autre plateau des masses marquées on ramène l'aiguille devant la division ***n***. L'équilibre se traduit par la relation

$$m_A.OA = m_B.OB. \qquad [1]$$

3. On *permute* les charges des plateaux. Si l'aiguille s'immobilise devant la division ***n***, la balance est juste. En effet ce nouvel équilibre s'écrit :

$$m_B.OA = m_A.OB. \qquad [2]$$

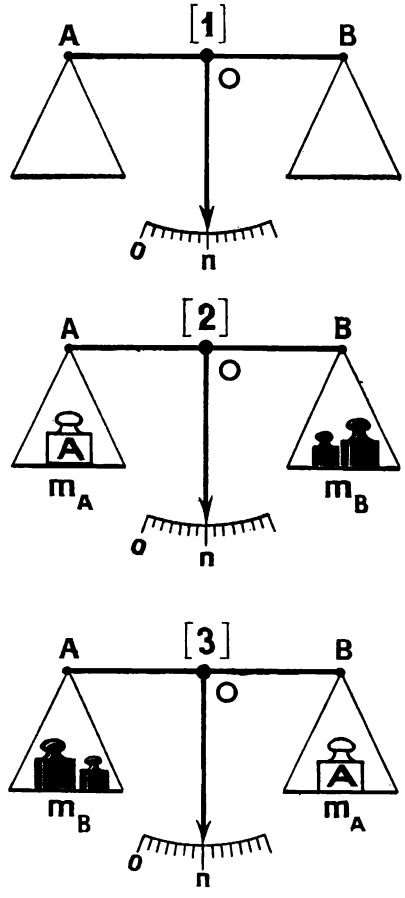


FIG. 9.

En divisant [1] et [2] membre à membre :

$$\frac{m_A}{m_B} = \frac{m_B}{m_A};$$

ou encore : $m_A = m_B$, ce qui entraîne : $OA = OB$. C'est précisément la condition de justesse.

Il n'existe pas de balance juste; cela tient à l'impossibilité matérielle où se trouvent les constructeurs de réaliser l'égalité rigoureuse des bras du fléau. Mais ce manque de justesse n'a pas la même importance dans une balance commerciale et dans une balance de laboratoire.

Dans la première, *ce défaut n'est pas apparent*, et le contrôle de la justesse effectué comme ci-dessus laisse croire que la balance est juste, car l'interversion du contenu des plateaux ne modifie pas l'équilibre de façon visible. D'ailleurs, le manque de justesse se traduit en définitive par une faible erreur sur la détermination d'une masse. Comme une certaine erreur peut être tolérée dans les transactions commerciales, *on peut se contenter de la simple pesée.*

Dans toutes les balances de précision, au contraire, *ce défaut est très facile à mettre en évidence*, et le contrôle ne laisse aucun doute sur le manque de justesse. Comme d'autre part l'erreur qui en résulte dans une simple pesée est en général très supérieure à l'erreur tolérée, on doit avoir recours à une méthode qui permette de *peser juste avec une balance fausse;* c'est la **double pesée.**

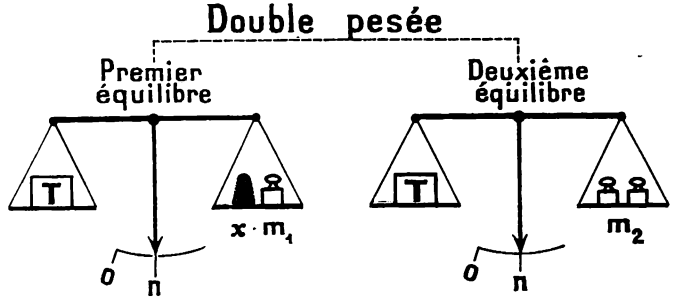


FIG. 10. — *Double pesée par substitution.*

DOUBLE-PESÉE. — Décrivons seulement la *double-pesée de* BORDA (1), dite aussi double pesée *par substitution* (fig. 10).

Premier équilibre : Installons sur le plateau de gauche, par exemple, un objet marqué de la boîte assez nettement plus lourd que l'objet à peser. Nous l'appellerons la ***tare*** (2); sa masse est T. L'objet à peser de masse x est placé sur l'autre plateau et, en ajoutant sur ce plateau des masses marquées dont la somme est m_1, nous amenons l'aiguille devant la division n du cadran.

(1) BORDA (v. notice biographique).

(2) La tare peut, en principe, être faite avec un objet quelconque. On doit éviter d'employer de la grenaille de plomb, du sable, etc. dont la manipulation est peu commode et souvent malpropre. On aura toujours intérêt à choisir comme tare *une masse marquée*. C'est toujours possible, sauf dans le cas où le corps à peser est plus lourd que le plus gros des objets marqués de la boîte dont on dispose.

Deuxième équilibre : Ne touchons pas à la tare. Enlevons le corps et les masses marquées du plateau, puis rétablissons l'équilibre précédent, avec l'aiguille devant la même division *n*, en chargeant le plateau de nouvelles masses marquées dont la somme est, maintenant, m_2.

Même si les longueurs des bras du fléau sont différentes (balance non juste), même si la position de référence de l'aiguille (division *n*) n'est pas celle que donne le fléau à vide, *le moment du poids de* m_2, *joue dans l'équilibre exactement le même rôle que le moment du poids de* $x + m_1$. Par suite :

$$x + m_1 = m_2,$$

et :

$$\boxed{x = m_2 - m_1.}$$

La double pesée décrite, ou une autre, dite par *permutation* (exercice nº 9) sont très employées au laboratoire. Mais comme elles demandent **deux équilibres** obéissant à l'application du théorème des moments, il faut être sûr que, pour ces deux équilibres, les bras de levier des forces appliquées au fléau sont restés invariables. Plus précisément, comme le montre une discussion, le *rapport* des longueurs l/l' des bras du fléau doit demeurer constant. Cela nous conduit à examiner une nouvelle qualité que doit présenter une balance.

6. LA FIDÉLITÉ, QUALITÉ ESSENTIELLE.

DÉFINITION PRATIQUE : ***On dit qu'une balance est fidèle quand, les mêmes corps étant placés à plusieurs reprises sur les mêmes plateaux, l'aiguille retrouve toujours la même position d'équilibre.***

CONTRÔLE. — Le contrôle de la fidélité est donc facile. On peut le faire en réalisant un équilibre quelconque, les plateaux étant chargés dans des conditions comparables à celles d'un emploi habituel. On enlève les charges après avoir noté la position de l'aiguille. En replaçant plusieurs fois les objets dans leurs plateaux respectifs, sans apporter une attention spéciale à leur position dans ces plateaux, on peut observer que l'aiguille reprend toujours la même position : la balance est alors *fidèle*. Mais il arrive que, pour faire reprendre à l'aiguille sa position initiale, il soit nécessaire d'ajouter sur un des plateaux une légère surcharge Δm. Dans ce cas la balance ne peut pas être considérée comme fidèle. Elle présente un *défaut de fidélité* qui peut se chiffrer par la valeur de Δm *grammes*.

CONDITION DE LA FIDÉLITÉ. — La fidélité est une ***condition indispensable;*** sans elle on ne pourrait avoir aucune confiance dans des indications de l'aiguille et par conséquent ni la simple pesée, ni la double pesée ne pourraient être envisagées. *Une balance non fidèle est inutilisable.*

Comment peut-on assurer la fidélité d'une balance de précision?

a) Le fléau doit être *rigide* pour supprimer tout risque de déformation accidentelle

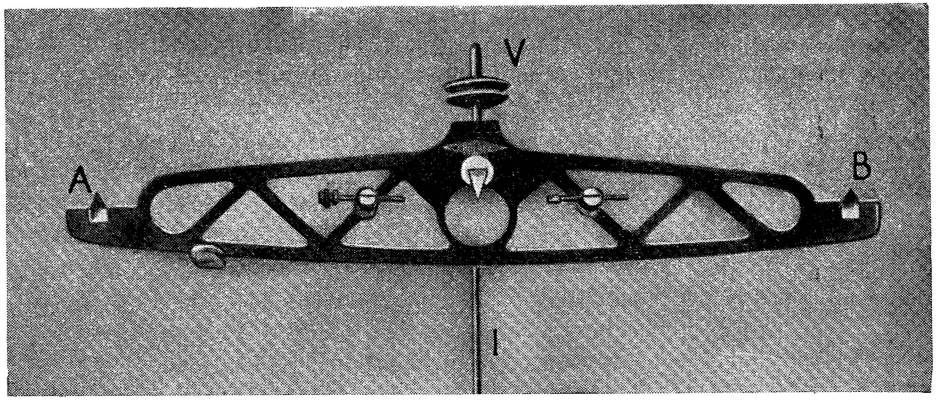


Photo Hatier.

FIG. 11. — *Un fléau de balance de précision.*

et tout fléchissement sous l'effet d'une charge trop forte. Toute balance possède d'ailleurs une *charge maximum* qu'il ne faut jamais dépasser.

b) Les variations éventuelles de la température doivent affecter *également* les deux bras du fléau. Nous verrons plus tard (chap. ***20***) que les longueurs l et l' varient alors dans le même rapport; $\frac{l}{l'}$ reste constant. On devra tenir compte de cette condition pour choisir la place de la balance dans une salle.

c) Les arêtes des couteaux doivent être *très fines* et *parallèles*, sinon les bras de levier des forces appliquées sur les couteaux latéraux subiraient des variations inadmissibles.

Répétons que les conditions de fidélité sont impératives. Les constructeurs attachent le plus grand soin à obtenir des appareils dont la fidélité ne laisse rien à désirer. On peut dire que les erreurs de pesées qui proviennent du manque de fidélité d'une bonne balance sont très faibles par rapport aux autres que nous allons maintenant examiner.

7. SENSIBILITÉ.

DÉFINITION PRATIQUE : ***On dit qu'une balance est sensible à 1 mg, 2 mg, ... ou 1 cg si, un équilibre étant réalisé, une masse de 1 mg, 2 mg, ... ou 1 cg est la plus petite masse qui, placée sur un des plateaux, modifie la position de l'aiguille de façon appréciable.***

CONTRÔLE. — Prenons une balance de demi-précision, en équilibre avec ses plateaux chargés. Repérons la position de l'aiguille.

Plaçons délicatement, *sans heurt*, sur un des plateaux une masse en lamelle de 1 mg. L'aiguille ne bouge pas... Répétons l'expérience en déposant des masses croissantes : 2 mg... 3 mg..., etc. Soit par exemple *1 cg* la masse la plus faible qui, ajoutée sans heurt, entraîne un déplacement visible de l'aiguille. On dit que la balance est *sensible au centigramme*.

On comprend que le résultat de ces essais dépend essentiellement de ce qu'on appelle un déplacement *visible*. En général, pour caractériser la sensibilité d'une balance d'une manière indépendante de l'opérateur, on fixe conventionnellement ce déplacement à la longueur d'une division du cadran gradué; on dira par exemple : « *cette balance est sensible à* 5 *mg par division* ».

CONDITIONS D'UNE BONNE SENSIBILITÉ. — Le calcul permet de déterminer les facteurs qui influent sur la sensibilité d'une balance (exercice 15). Nous nous contenterons de les énumérer, et d'en tirer les conséquences. Leur étude pourra faire l'objet d'une manipulation (T. P.). La sensibilité est :

1° ***proportionnelle à la longueur de l'aiguille.***

2° ***proportionnelle à la longueur des bras du fléau.***

3° ***inversement proportionnelle à la masse du fléau.***

4° ***inversement proportionnelle à la distance du centre de gravité du fléau à l'arête très fine du couteau central.***

Pour réaliser une balance sensible, il faut tenir compte de ces résultats :

On a intérêt à prendre une aiguille *longue;* elle doit cependant être assez *légère* et *rigide.*

Les conditions 2° et 3° paraissent incompatibles, un fléau de grandes dimensions étant nécessairement lourd. Si nous cherchons par exemple à doubler la sensibilité d'une balance en remplaçant son fléau par un autre, de longueur *double* et de rigidité comparable, nous devons donner à ce nouveau fléau la même forme, en multipliant par ***2*** ses dimensions linéaires; le volume est multiplié par 2^3, soit par ***8*** et la masse également, si bien que la sensibilité est multipliée par $\frac{2}{8}$; *elle devient* ***4 fois plus faible!*** On a donc au contraire avantage à employer des fléaux *courts* fabriqués en *alliages légers.* En pratiquant certains *évidements* dans la masse, on allège encore le fléau sans nuire à sa rigidité (fig. 11).

Par construction, le centre de gravité du fléau est déjà voisin de l'arête du couteau central. Dans certaines balances de laboratoire, on peut légèrement *déplacer ce centre de gravité* en agissant sur *une vis* V (fig. 11) qu'on éloigne ou qu'on rapproche de l'arête.

On pourrait même, en faisant coïncider le centre de gravité avec l'arête, donner à la balance une sensibilité infiniment grande. On n'a pas intérêt à le faire, car d'une part les oscillations avant l'arrêt à l'équilibre devenant alors très lentes, les pesées seraient trop longues, d'autre part on arriverait ainsi à une sensibilité pour laquelle la fidélité ne pourrait plus être assurée, ce qu'il faut absolument éviter (voir chap. II, § 7).

Une balance ordinaire (Type Roberval, § 10) est sensible au décigramme.

Un trébuchet de pharmacien est sensible au centigramme.

Une bonne balance de laboratoire, permettant des pesées jusqu'à 100 ou 200 g est sensible à $\frac{1}{10}$ de milligramme; cela signifie que si on évalue à 83,5325 g la charge d'un des plateaux, dans un équilibre, la valeur exacte qui réalise l'équilibre est comprise

$$\text{entre} \begin{cases} 83{,}5325 + 0{,}0001 \text{ g} \\ \quad \text{et} \\ 83{,}5325 - 0{,}0001 \text{ g.} \end{cases}$$

L'*incertitude absolue* que comporte la lecture est donc 0,1 mg.

8. CONSEILS POUR L'EXÉCUTION DES PESÉES. — Une pesée doit toujours être effectuée avec *soin, ordre, propreté.* Voici quelques règles qu'il faut observer, même pour des pesées courantes (Travaux pratiques) :

1. Connaître la charge maximum de la balance. Les constructeurs l'appellent « *force* » de la balance. Une « force de 1 kg » signifie que chaque plateau ne peut être soumis à une force supérieure à 1 kgf. Le fléau supporte alors une force de 2 kgf. On ne doit jamais dépasser la limite ainsi définie sous peine de déformer le fléau ou de détériorer les couteaux.

2. Évaluer la sensibilité de la balance. Il faut, lors d'un essai, se rapprocher des conditions comparables à celles qui seront réalisées lors des équilibres. Vérifier également que la *fidélité* est suffisante, car, si, par exemple, un défaut de fidélité se chiffre par 2 cg alors que la balance est sensible à 1 cg, c'est évidemment la fidélité défectueuse qui introduit l'erreur (2 cg) pour chacun des équilibres.

3. Opérer toujours par double-pesée, sauf s'il s'agit d'un essai préliminaire pour lequel la précision est sans importance, ou encore s'il est reconnu déjà qu'un défaut de justesse n'entraîne qu'une erreur inférieure à celle qui vient du manque de sensibilité (certaines balances de Roberval).

4. Choisir comme tare une masse marquée. La composition d'une boîte le permet toujours, sauf si son étalonnage est vraiment défectueux.

5. Manipuler les masses marquées avec des pinces. La pince « *Brucelle* » est indispensable quand on utilise les subdivisions du gramme; elle est plus commode que les doigts pour les multiples du gramme, au moins jusqu'à 100 g.

6. Essayer les masses marquées toujours dans l'ordre rigoureusement décroissant, plutôt que de se livrer à des tâtonnements désordonnés qui se traduisent presque toujours par une perte de temps.

7. Grouper les masses marquées et les corps à peser vers le centre de leurs plateaux respectifs. Un défaut de fidélité éventuel de la balance peut être ainsi atténué.

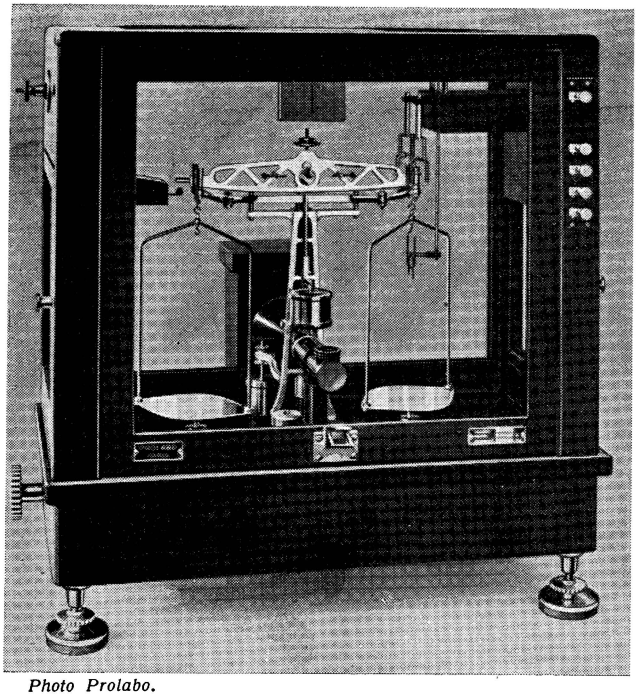


Photo Prolabo.

FIG. 12. — **Balance d'analyse à fléau symétrique.**

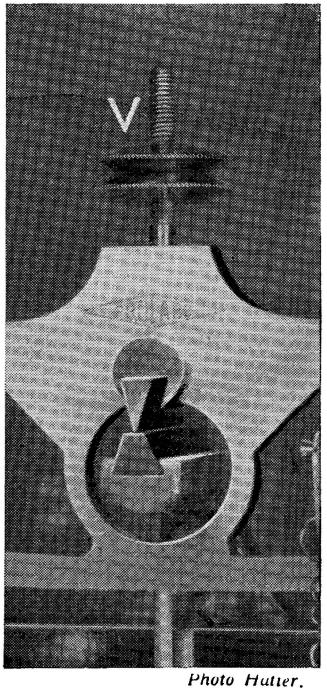


Photo Hutier.

FIG. 13. — **Détail du couteau central.** *En rapprochant ou en éloignant la vis V de l'arête, on diminue ou on augmente la sensibilité de la balance*

9. LES BALANCES DE PRÉCISION. — Les balances de précision, très employées aujourd'hui dans tous les laboratoires, se rattachent à trois types :

a) Balance à fléau symétrique. — Un modèle est représenté par la photographie de la page 119. C'est le fléau de cette balance que montre la figure 11. Le fléau *court, léger,* largement *ajouré* est en alliage d'aluminium. Le couteau central, en *acier dur,* oscille sur un plan très dur en *agate.* Sur les couteaux latéraux en acier reposent, par des plans en agate, les étriers qui soutiennent les plateaux. Le réglage de la sensibilité se fait à l'aide de la vis V située au-dessus du couteau central. L'aiguille, assez longue, est munie à sa partie inférieure d'un repère très fin qui défile devant une graduation transparente. Un système d'éclairage, donne par projection, face à l'opérateur, l'image agrandie de la graduation fixe et du repère mobile. Grâce à ce montage, la manipulation des masses marquées inférieure à 1 décigramme peut être évitée. Dans son mouvement, l'aiguille entraîne une palette qui plonge dans un liquide; les oscillations du fléau sont ainsi amorties et, tout en conservant leur précision, les pesées sont plus rapides.

La balance, qui doit être placée sur un support *très stable à l'abri des vibrations* (pilier en ciment, poutre de fer scellée au mur) est logée dans une *cage vitrée.* Elle est ainsi soustraite aux courants d'air qui, agissant sur les plateaux, ne permettraient pas d'ajuster les équilibres. Un desséchant placé dans la cage absorbe l'humidité de l'air. On doit éviter toute variation, même très faible, de la température qui n'intéresserait qu'un des bras du fléau (exercice 5). La balance ne doit pas être exposée au soleil.

Par un contact prolongé avec les plans d'agate, les trois couteaux finiraient par s'émousser, au détriment de la sensibilité et de la fidélité : un dispositif de *fourchettes* manœuvré de l'extérieur de la cage, les maintient hors du contact quand la balance n'est pas en service.

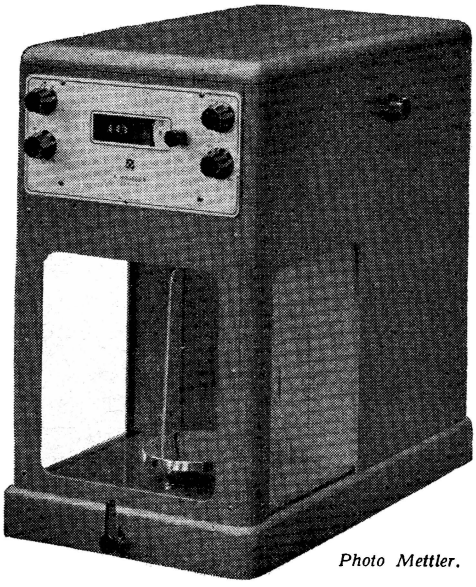


Photo Mettler.

FIG. 14. — *Vue d'ensemble extérieure d'une balance à un seul plateau* (*voir* § 9b).

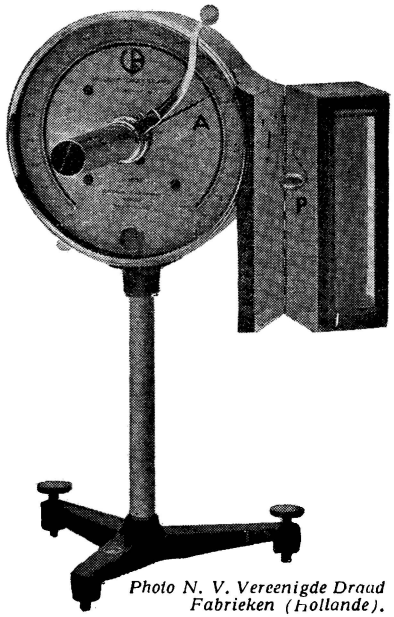


Photo N. V. Vereenigde Draad Fabrieken (Hollande).

FIG. 15. — *Balance de torsion. La boule-poignée entraîne la torsion du fil, mesurée par l'aiguille* A. *Pendant la pesée le plateau* P *est enfermé dans la cage vitrée* (voir § 9c).

b) Balance à un seul plateau. — Puisque la détermination précise d'une masse exige toujours une double pesée (presque toujours par la méthode de Borda à tare constante) il paraît inutile de disposer de deux plateaux et même de donner aux deux bras du fléau la même longueur. On construit aujourd'hui des balances à *un seul plateau* dont la figure 16 indique le mécanisme.

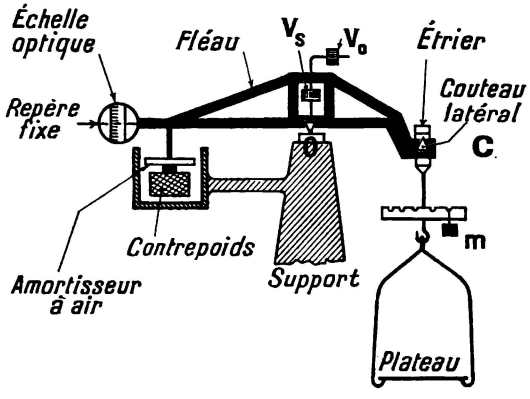


FIG. 16. — *Balance à un seul plateau.*

Le fléau n'a plus que *deux couteaux* : le couteau central *O*, oscillant sur un plan dur et le couteau *C* qui soutient le plateau. Un contrepoids fixe joue en somme le rôle de la tare invariable. — C'est le fléau lui-même qui sert d'aiguille, entraînant dans sa rotation une *échelle optique* destinée à amplifier ses déplacements. La graduation de l'échelle est de longueur suffisante pour éviter l'emploi de masses inférieures à 100 milligrammes. Les masses marquées ordinaires sont manipulées mécaniquement, par des boutons de commande extérieurs à la cage et déposés par des *fourchettes* sur une barre horizontale fixée au support de plateau (masse ***m*** de la figure).

Une vis V_s sert au réglage de la *sensibilité*; une autre vis V_o règle le *zéro* de l'échelle optique devant son repère fixe. Un tel montage permet surtout d'assurer une *excellente fidélité*, la balance travaillant toujours dans des conditions de charge très voisines. On gagne aussi sur la *rapidité des pesées*.

c) Balance de torsion (fig. 17). — Cet appareil comprend essentiellement un ***fil de torsion*** tendu entre le point O' fixe et le point O solidaire d'une *poignée tournante;* un fin *bras de levier* AB perpendiculaire à OO' porte en B un léger *plateau*. On peut repérer une position du bras AB grâce à un *index* ***i***. Si une masse ***m*** exerce en B son poids $\vec{p}$, B s'abaisse et le fil se tord. Mais en tournant la poignée dans le sens convenable on oppose au moment de $\vec{p}$ le moment de torsion du fil jusqu'à ce que AB revienne devant l'index, demeuré fixe. L'angle de torsion se lit sur un cadran circulaire gradué indépendant du fil mais dont le centre est sur l'axe OO'. On conçoit que ce cadran peut être, par un étalonnage, directement gradué en *forces* (poids connus agissant sur le point B) ou en *masses*.

La balance de torsion, commode pour la mesure des forces assez faibles, permet des pesées précises et très rapides; elle est utilisée pour les opérations en série dans certains laboratoires. La figure 15 montre l'aspect réel de l'appareil.

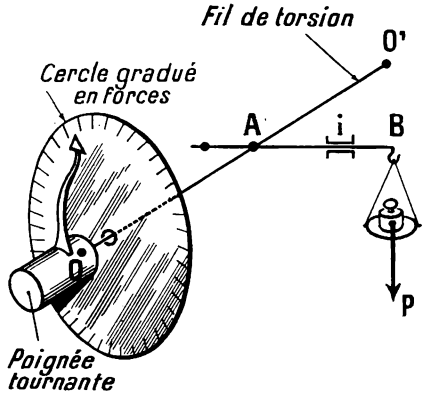


FIG. 17. — *Balance de torsion (très schématique).*

Une pesée de haute précision est une opération délicate. Qu'il nous suffise d'indiquer quelques facteurs dont nous connaîtrons la signification précise plus loin et dont il faut tenir compte dans certains cas : *pression atmosphérique, température, humidité* de l'air, *densité* des masses marquées et du corps à peser.

Toutes ces précautions étant prises, on obtient des résultats remarquables de précision. Quand on songe qu'il est possible de déterminer en trente secondes la masse d'un corps de 200 g à 0,1 mg près, soit avec une erreur relative de

$$\frac{1}{10 \times 200\,000} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2\,000\,000}$$

on doit être convaincu que ***la balance est un des instruments les plus précis de la Physique.***

C. BALANCES USUELLES

Les balances usuelles, destinées au commerce, sont des appareils *commodes*. Ils permettent des pesées *rapides*, mais *peu précises*.

10. BALANCE DE ROBERVAL (1) (fig. 18). — Cet appareil comprend un fléau AB oscillant autour du couteau O, et une tige $A'B'$ appelée *contre-fléau* qui peut osciller autour de l'axe fixe O' parallèle à O.

Deux barres verticales T et T' articulées en A, A', B, B', maintiennent parallèles le fléau et le contre-fléau tout en portant les plateaux. Le quadrilatère ainsi constitué est donc un *parallélogramme déformable* dont les points O et O' restent fixes (fig. 19).

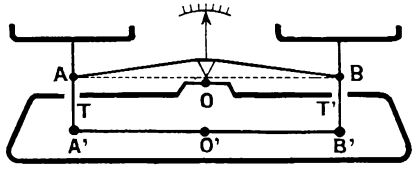


FIG. 18. — *Schéma d'une balance de Roberval.*

Quand on charge un des plateaux, les quatre côtés changent de position; mais les tiges T restent *verticales* et les plateaux qu'elles supportent restent *horizontaux*.

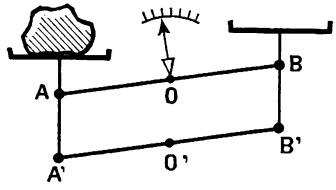


FIG. 19. — *Le parallélogramme déformable.*

11. BALANCE ROMAINE (fig. 20). La balance romaine comprend une barre rigide AB mobile autour d'un couteau O. Le deuxième couteau A supporte le corps à peser. Un curseur mobile C peut se déplacer le long de la portion graduée OB. Son poids p agit donc par le bras du levier OC et si x est le poids à mesurer on a, à l'équilibre (en supposant le centre de gravité du fléau sur la verticale de O) :

$$x \times \mathrm{OA} = p \times \mathrm{OC}$$

ou

$$x = \frac{p}{\mathrm{OA}} \times \mathrm{OC},$$

comme p et OA sont invariables, x est proportionnel à OC. On peut donc graduer la tige OB directement *en poids*. Le principal avantage de cet instrument, par ailleurs fort *lourd*, *incommode* et *peu sensible*, est d'éviter la manipulation de masses marquées.

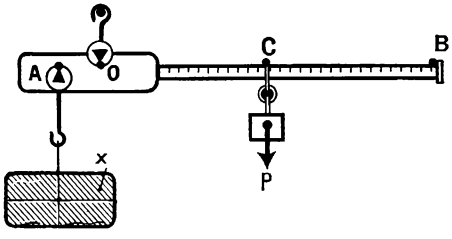


FIG. 20. — *Balance romaine.*

(1) ROBERVAL : Notice biographique.

12. BALANCES AUTOMATIQUES. — On sait que la balance de Roberval et la balance romaine sont presque partout remplacées à l'heure actuelle par des balances ou bascules *automatiques* dans lesquelles une aiguille marque le *poids*. Les pesées sont beaucoup plus rapides.

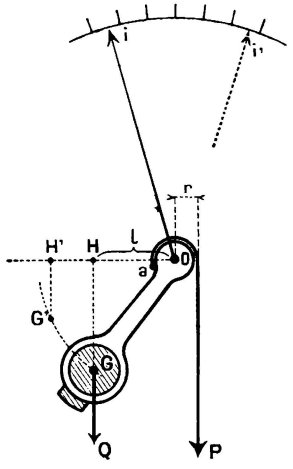


FIG. 21.

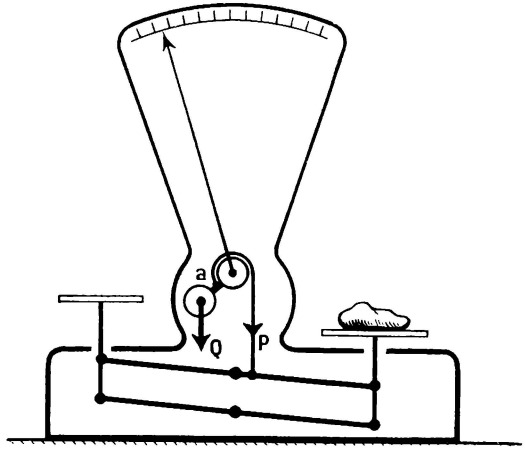


FIG. 22.

Un type simple de balance automatique comporte un corps assez lourd (contrepoids) (fig. 21) pouvant tourner autour d'un couteau O. Autour de O, le contrepoids est taillé en forme de *cylindre* de rayon r et de centre O. Un ruban d'acier fixé en a s'enroule en partie sur le cylindre et supporte la force P à mesurer. Le poids du contrepoids étant Q et son centre de gravité G, l'équilibre est réalisé quand on a (Théorème des moments) :

$$P \times r = l \times Q.$$

Remplaçons P par une force plus grande P'; le contrepoids est soulevé et G vient en G' de sorte que l'on a :

$$P' \times r = l' \times Q.$$

La pointe de l'aiguille i se déplace et vient en i' devant un cadran qu'on peut graduer *directement* en poids.

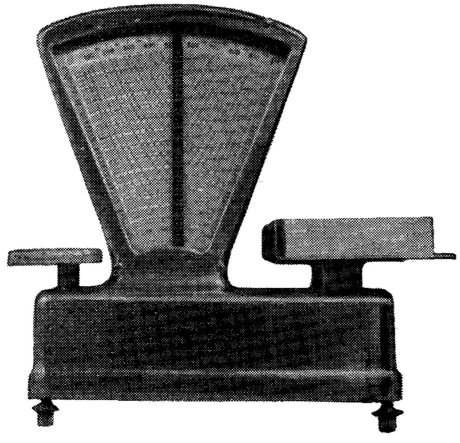


FIG. 23. — *Une balance automatique de commerce.*

Un tel dispositif peut être associé à une balance du type Roberval (fig. 22 et 23).

EXERCICES

1. Quelles masses de la boîte (1 000 g à 1 g) faut-il prendre pour réaliser : 493 g, 522 g, 13 g, 22 g?

2. On a construit des boîtes de masses divisionnaires comprenant les masses : 1 mg, 2 mg, 3 mg, 5 mg. Montrer quel avantage comporte cette subdivision nouvelle sur la subdivision habituelle : 1, 2, 2, 5.

3. Pourquoi choisit-on l'acier inoxydable pour fabriquer des objets marqués? Pourquoi peut-on se contenter de la fonte pour les masses de 5 kg à 50 kg? Pourquoi ne faut-il pas toucher les *faibles* masses avec les doigts? Pourquoi ne doit-on jamais les nettoyer en les frottant?

4. On place sur le plateau gauche G d'une balance une masse de 100 g; l'équilibre est établi en plaçant sur le plateau D 100,2 g. Quelle est la longueur du bras gauche du fléau si le bras droit a pour longueur exacte 100 mm?

Rép. : $l = 100{,}2$ mm.

5. Les deux bras du fléau d'une balance ont comme longueurs très voisines l et l'. Montrer que l'erreur relative qui en résulte dans une simple pesée est peu différente de $\left|\frac{l-l'}{l}\right|$.

6. On désire peser dans un flacon 200 g d'un liquide, par double pesée de Borda. Enumérer le nombre minimum d'opérations à effectuer.

7. Une balance étant en équilibre, l'aiguille se trouve devant la division 4. Une masse de 1 cg ajoutée sur l'un des plateaux amène l'aiguille devant la division 8. Quelle est la sensibilité de la balance, si on admet qu'on peut apprécier un écart de l'aiguille de $\frac{1}{4}$ de division?

Rép. : 0,06 cg.

8. Démontrer que la sensibilité d'une balance est proportionnelle à la longueur de l'aiguille.

9. *Double pesée de Gauss* (1). Un solide placé sur le plateau D d'une balance est équilibré par 38,25 g placés sur l'autre plateau. Placé sur le plateau G il est équilibré par 38,32 g. Quel est sa masse exacte?

Rép. : 38,28 g.

10. On dispose d'une balance sensible au centigramme, et d'une boîte de masses marquées de 500 g à 1 mg. On désire peser un corps de masse x. On prend la masse de 500 g comme tare. Enumérer dans l'ordre chronologique et décrire toutes les opérations effectuées dans la double pesée de Borda en supposant que la masse exacte est $x = 322{,}24$ g.

11. Quel avantage y a-t-il à prendre comme tare un objet de la boîte? Comment le choisit-on? Peut-on toujours le faire?

12. Chercher pourquoi on doit essayer les masses marquées dans l'ordre rigoureusement décroissant quand on veut réaliser un équilibre.

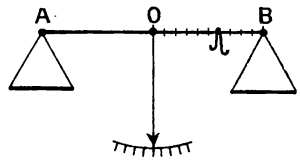


FIG. 24.

13. *Balance à cavalier.* — Le fléau d'une balance (fig. 24) étant gradué en dix parties égales entre le couteau central O et le couteau latéral B, on dispose d'un cavalier dont la masse exacte est 1 cg, qui permet d'ajuster les équilibres en modifiant sa position le long de OB.

Montrer comment ce dispositif permet d'éviter la manipulation de masses inférieures au centigramme.

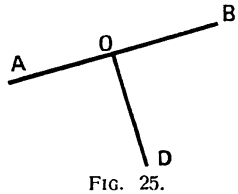


FIG. 25.

14. Une balance (fig. 25) est constituée par deux tiges métalliques soudées à angle droit. Le fléau AB a ses deux bras égaux, de longueur 20 cm. L'aiguille OD a 30 cm de long et pèse 40 gf.

Le couteau central est O.

Quelle est la surcharge x qui, placée en A fait dévier la pointe de l'aiguille de 1 mm?

Rép. 0,1 g

15. Un fléau de balance est assimilé à la figure ci-contre (axe du couteau central en O; G centre de gravité du fléau) (fig. 26).

(1) GAUSS (voir notice biographique).

$OA = OB = l$; $OG = d$; $OI = s$.

On place une surcharge p en A.

Evaluer la longueur $KI = x$ en fonction de P, d, l, p.

Montrer que la sensibilité est proportionnelle à l et à s et inversement proportionnelle à P et à d.

(On écrira l'équilibre des moments des forces appliquées au fléau par rapport à l'axe O. On assimilera KI au déplacement de la pointe de l'aiguille et OA au bras de levier de p, pour de faibles inclinaisons du fléau.

Rép. : $x = \frac{s.p.l}{P.d}$.

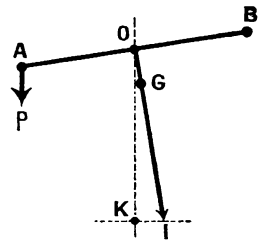


FIG. 26.

PROBLÈMES

1. 1° Pour vérifier la justesse d'une balance on équilibre un objet avec des masses marquées dont la somme est 72,58 g. Changeant l'objet de plateau, il faut maintenant pour l'équilibrer 72,50 g.

a) la balance est-elle juste?

b) quel est le rapport $\frac{l}{l'}$ des deux longueurs des bras du fléau?

c) quelle est la masse exacte du corps essayé?

d) quelle est l'erreur absolue Δm commise sur la masse quand on fait sa détermination par simple pesée avec cette balance?

2° Pour une double pesée on dispose d'une boîte de masses marquées dont la plus forte est 500 g et la plus faible 1 g et d'une deuxième boîte de 500 mg à 1 cg compris. On sait, de plus, que la masse m de l'objet étudié est voisine de 70 g. Les deux équilibres sont résumés ainsi :

Tare	$\longleftrightarrow$	m + 27,45 g	[1]
Tare	$\longleftrightarrow$	99,98 g.	[2]

a) Quelle est la masse marquée qui a servi à faire la tare?

b) Donner le détail des masses marquées ayant servi à réaliser les sommes 27,45 g et 99,98 g, sachant que l'opérateur en a utilisé un nombre minimum.

c) Indiquer la précision de la pesée en exprimant numériquement l'incertitude absolue et l'incertitude relative.

2. Un fléau de balance porte trois couteaux rigoureusement parallèles et dans un même plan. Les longueurs des bras du fléau sont égales à 10 cm. Le fléau (avec son aiguille) pèse 30 gf. L'aiguille a une longueur de 20 cm.

1° Le fléau étant au repos, horizontal, et l'aiguille verticale, on dépose sur le couteau de gauche une masse de 5 cg; l'aiguille tourne de 30°. Quelle est la distance du centre de gravité du fléau au couteau central?

2° Quel serait l'angle de rotation de l'aiguille si, le poids du fléau devenant 60 gf, les autres conditions du problème restaient identiques?

3° Avec le fléau de 30 grammes quelle est la sensibilité de la balance? On l'exprimera en milligrammes pour une déviation de 1 millimètre de l'extrémité de l'aiguille.

4° Quelle incertitude relative comporte la détermination par double pesée de la masse d'un objet, voisine de 100 grammes, en admettant que la position de l'extrémité de l'aiguille peut être repérée à $\frac{1}{4}$ mm près? On donne $\sin 30° = \frac{1}{2}$; $\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$; $\sqrt{3} = 1{,}73$. On rappelle que, si α est un angle très petit, on peut écrire :

$$\alpha \simeq \sin\alpha \quad \text{et} \quad \cos\alpha \simeq 1.$$

3. Pour construire une balance d'étude on choisit comme fléau une plaque homogène en forme de triangle isocèle ABC (fig. 27). $AB = 24$ *cm*; hauteur $CO = h = 6$ *cm*; poids de la plaque $P = 45$ *gf*; couteau central en O; couteaux latéraux en D et E, tels que

$$OD = OE = l = 10 \text{ cm};$$

poids de chacun des trois couteaux : $P_1 = 10$ *gf*. OB joue le rôle d'une aiguille, le point B se déplaçant devant une graduation en millimètres. On désignera par L la longueur OB, par d la distance du centre de gravité du fléau muni de ses couteaux à l'arête O du couteau central, par a le déplacement, supposé toujours *très faible*, du point B.

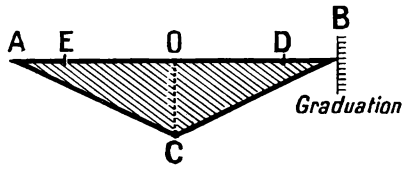


FIG. 27.

1° Déterminer, en millimètres, la distance *d*.

2° Quel poids *p* faut-il faire agir sur le couteau *E* pour que *B* se déplace de 1 mm?

3° Démontrer que la sensibilité *s*, définie comme le rapport $s = \frac{a}{p}$, peut se mettre sous la forme : $s = \frac{l.L.}{(3P_1 + P_0)\,d}$.

4° Comment est modifiée la sensibilité si le triangle formant fléau, constitué par la même matière, n'a plus qu'une hauteur $OC' = 3$ *cm*? (éviter les calculs compliqués).

TRAVAUX PRATIQUES

N° 11. Sensibilité d'une balance.

N° 12. Étude d'une balance.

N° 13. Exécution de pesées correctes.

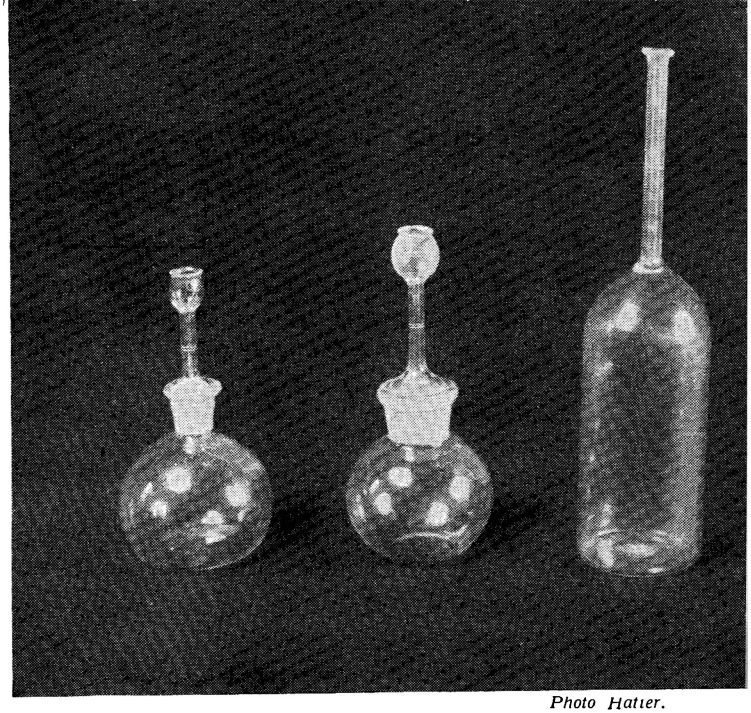


Photo Hatier.

FIG. 1. — *Flacons à densités pour solides et liquides.*

10. MASSE VOLUMIQUE. POIDS VOLUMIQUE. DENSITÉ

A. GÉNÉRALITÉS. DÉFINITIONS

1. — Quand nous disons : le fer est « *plus lourd* » que l'aluminium, nous sous-entendons toujours que deux objets de dimensions identiques, l'un en fer, l'autre en aluminium n'ont pas le même poids : celui du fer est plus élevé. Même si les dimensions et la forme des deux objets sont différentes la confrontation conserve un sens, pourvu que les *volumes* soient égaux.

Pour des substances différentes, on peut ainsi comparer soit les *poids*, soit les *masses* de volumes égaux; un troisième moyen est souvent aussi utilisé; il fait intervenir une notion nouvelle : la *densité.*

2. MASSE VOLUMIQUE (1).

Définition : *La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps.*

(1) On dit aussi : *masse spécifique.*

Si m est la masse d'un volume V, ρ désignant la masse volumique :

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

UNITÉS : Pour exprimer une masse volumique, il faut indiquer une unité de masse et une unité de volume. On associe généralement le *kilogramme* et le *mètre cube* ***(kg/m³)***, parfois le *gramme* et le *centimètre cube* ***(g/cm³)***. Ainsi, la masse volumique du *fer* est 7800 *kg/m³ ou 7,8 g/cm³*.

La masse volumique de ***l'eau liquide*** *est très voisine de 1 000 kg/m³ ou 1 g/cm³ et nous adopterons ce nombre pour les calculs à venir.*

Celle de ***l'air***, puisé dans l'atmosphère à la température habituelle d'un laboratoire est voisine de 1,3 *kg/m³*.

Plus tard nous apprendrons que les masses volumiques des solides, liquides et gaz dépendent des conditions dans lesquelles on les envisage.

3. POIDS VOLUMIQUE[1].

Définition : *Le poids volumique d'un corps est le poids de l'unité de volume de ce corps.*

Si P est le poids d'un volume V, ϖ désignant le poids volumique :

$$\varpi = \frac{P}{V}.$$

UNITÉS : Les unités de poids volumique sont dérivées des unités de *poids* (forces) et des unités de *volume*. On doit alors associer le *newton* et le *mètre cube* ***(N/m³)***. Mais l'usage est très répandu d'utiliser le *kilogramme-force* et le *mètre-cube* ***(kgf/m³)*** ou le *kilogramme-force* et le *décimètre cube* ***(kgf/dm³)*** ou encore le *gramme-force* et le *centimètre-cube* ***(gf/cm³)***.

Or, on a retenu qu'une masse de 1 kilogramme possède un poids de 1 kilogramme-force ou 9,81 newtons. Par suite le poids volumique du *fer* doit être évalué à :

$$\varpi = 7\,800 \text{ kgf/m}^3$$
$$\text{ou } \varpi = 7{,}8 \text{ gf/cm}^3$$
$$\text{ou } \varpi = 7\,800 \times 9{,}8 = 77\,220 \text{ N/m}^3.$$

Pour ***l'eau liquide***, dans les conditions habituelles :

$$\varpi = 1\,000 \text{ kgf/m}^3 = 9\,810 \text{ N/m}^3.$$

Pour ***l'air***, dans les conditions habituelles :

$$\varpi = 1{,}3 \text{ kgf/m}^3 = 1{,}3 \times 10^{-3} \text{ gf/cm}^3 = 12{,}7 \text{ N/m}^3.$$

Comme la masse volumique, le poids volumique d'une substance dépend des condi-

(1) On dit aussi : *poids spécifique*.

tions expérimentales, mais, de plus, nous savons qu'il varie légèrement avec le lieu où on le considère.

Remarque. Entre la *masse volumique* ρ et le *poids volumique* ϖ d'une même substance existe la relation fondamentale entre la masse et le poids d'un même objet, indiquée au § 4 de la leçon 8.

$$\varpi = \rho \cdot G$$

poids volumique — masse volumique — intensité du champ de la pesanteur

La valeur numérique de G étant 9,81 si le poids est exprimé en *newtons* et la masse en *kilogrammes*.

4. DENSITÉ.

Définition : *On appelle densité d'une substance le rapport entre la masse d'un certain volume de cette substance et la masse du même volume d'un corps de comparaison, pris dans les mêmes conditions.*

Désignons par m la masse d'un certain volume de substance et par m' celle du *même* volume du corps de comparaison, pris aux mêmes conditions. Soient P et P' les poids respectifs des deux volumes cités, mesurés au même lieu. On peut alors résumer la définition précédente par :

densité ..... $d = \frac{m}{m'} = \frac{P}{P'}$ ..... mesurés au même lieu

a) Pour les solides et les liquides, le corps de comparaison est (à moins d'indication contraire) ***l'eau liquide.*** Par conséquent :

— *la densité de l'eau liquide est, par définition* ***1*** *:*

— la densité du *fer* est : $d = \frac{7\,800}{1\,000} = 7{,}8$.

Comme la masse volumique de l'eau liquide est 1 000 kg/m³, on voit que la densité d'une substance doit s'exprimer par un nombre sous-multiple décimal du nombre qui exprime sa masse volumique.

b) Pour les gaz, le corps de comparaison est, sauf indication contraire, ***l'air.*** Par suite :

— *la densité de l'air est* ***1;***

— celle d'un *gaz quelconque* peut se calculer aisément si on en connaît la masse volumique. Par exemple, nous avons noté que le poids de 1 m³ de gaz carbonique (conditions habituelles) est 1,95 kgf. Nous pouvons maintenant interpréter cette indication avec un langage correct : son poids est 1,95 kgf; sa masse est 1,95 kg; sa densité est :

$$d = \frac{1{,}95}{1{,}3} \simeq 1{,}5.$$

Remarques importantes : D'après sa définition une densité est le *rapport* de deux grandeurs de même espèce (rapport de deux poids, ou rapport de deux masses). Donc :

a) Si on calcule une densité par le rapport de deux *poids*, il faut, en toute rigueur, que ces deux poids soient évalués au *même lieu.*

b) La densité est un *nombre abstrait.* Faire suivre ce nombre d'une unité serait une faute.

5. TABLEAU RÉCAPITULATIF. — Afin de retenir plus aisément les correspondances entre les trois grandeurs que nous venons de définir et pour adopter un langage strictement correct, rassemblons quelques résultats :

	MASSE VOLUMIQUE	POIDS VOLUMIQUE	DENSITÉ
Relation de définition	$\rho = \frac{m}{V}$	$\varpi = \frac{P}{V}$	$d = \frac{m}{m'} = \frac{P}{P'}$: nombre abstrait ; donc
Unités habituelles (les unités conseillées sont encadrées)	kg/m³ | g/cm³	N/m³ | gf/cm³ ; dyne/cm³	pas d'unité
Exemples — **Fer :**	7 800 kg/m³	7 800 × 9,81 N/m³ ; 7,8 gf/cm³	7,8 [par rapport à l'*eau*]
Exemples — **mercure :**	13 600 kg/m³	13 600 × 9,81 N/m³ ; 13,6 gf/cm³	13,6 [par rapport à l'*eau*]
Exemples — **gaz carbonique :**	1,95 kg/m³	1,95 × 9,81 N/m³ ; 0,00195 gf/cm³	1,5 [par rapport à l'*air*]

B. MESURES DES MASSES VOLUMIQUES DES SOLIDES [1]

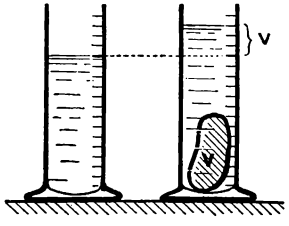


FIG. 2. — *Mesure rapide du volume d'un solide.*

6. MÉTHODE RAPIDE. — La masse *m* se détermine par une pesée. Le volume V peut, dans certains cas, être calculé à partir des dimensions géométriques du solide si celui-ci a une forme simple (cube, sphère, etc.). Dans les autres cas, on peut plonger le solide dans une éprouvette graduée contenant de l'eau (fig. 2). Le solide

(1) La mesure des masses volumiques des solides et des liquides sera faite en *Travaux Pratiques.*

déplace un volume d'eau *égal au sien*, mesuré directement sur la graduation.

La méthode est rapide, mais peu précise à cause de l'erreur assez grande sur la mesure du volume V.

7. MÉTHODE DU FLACON. — Au lieu de mesurer directement le volume V, on peut le déterminer par *pesée de l'eau déplacée*. C'est la méthode précise dite *méthode du flacon* à cause de l'appareil employé :

a) **Le flacon.** — Un flacon destiné à cette mesure a la forme de la figure 3. Sa contenance est de 20 à 50 cm³. Le *col*, parfaitement rôdé et légèrement conique reçoit un bouchon B également rôdé qui s'ajuste exactement et toujours de la même manière sur le flacon. Le bouchon, creux, est surmonté d'un tube T de section intérieure *très étroite*, sur lequel est gravé un repère R. La photographie de la page 126 donne une idée de l'appareil.

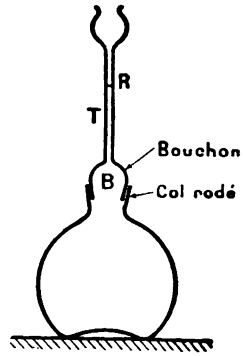


FIG. 3. — *Flacon à densité (solides et liquides).*

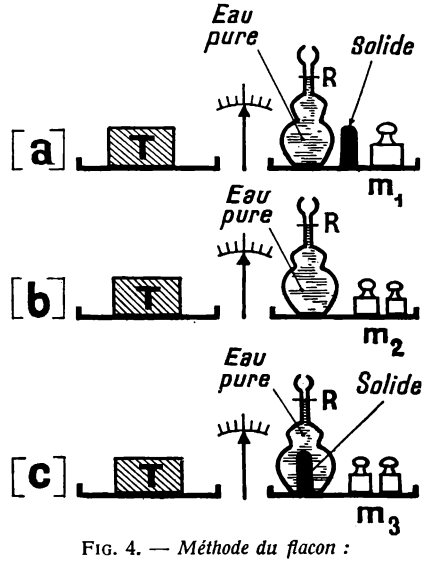


FIG. 4. — *Méthode du flacon : les 3 équilibres.*

b) **Expérience : 1. Premier équilibre.** — Remplissons d'eau pure (1) le flacon jusqu'à affleurement du liquide en R. Après avoir essuyé soigneusement le flacon, portons-le sur le plateau d'une balance à côté du solide étudié. Choisissons une tare et réalisons l'équilibre avec des masses marquées m_1 (fig. 4, *a*).

2. **Deuxième équilibre.** — Enlevons le solide. Rétablissons l'équilibre à l'aide des masses dont la somme est maintenant m_2 (fig 4, *b*).

3. **Troisième équilibre.** — Enlevons le bouchon; introduisons le solide dans le flacon. Rebouchons et amenons de nouveau l'eau jusqu'au trait d'affleurement R. Reportons le flacon bien essuyé sur la balance et réalisons l'équilibre avec des masses m_3 (fig. 4, *c*).

(1) Si l'eau attaque le solide ou le dissout, on devra prendre un autre liquide de poids volumique connu.

$m_2 - m_1$ donne, *par double pesée*, la masse m (en grammes) **du solide.**

$m_3 - m_1$ donne, *par double pesée*, la masse en grammes, donc le volume V en cm³ de l'eau enlevée (égal au volume V occupé par le solide); d'où la masse volumiqe :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1}.$$

La méthode qui fait intervenir uniquement des pesées, est susceptible d'une grande précision. Seule l'erreur d'affleurement est à craindre : il faut en effet que le liquide s'élève dans le tube T exactement à la *même hauteur* dans les équilibres *a*, *b* et *c*. C'est pour diminuer cette erreur que le canal doit être très étroit.

8. RÉSULTATS. — Le tableau suivant donne les valeurs approchées de masses volumiques de quelques solides à la température ordinaire :

Masse volumique en g/cm³ (vers 15°).

MÉTAUX PURS		MÉTALLOÏDES PURS		SUBSTANCES DIVERSES	
Platine	21,5	Soufre	2	Verre ordinaire	2,5
Or	19,3	Carbone :		Sapin	0,5 à 0,7
Plomb	11,3	(graphite)	2,5	Chêne	0,6 à 1,2
Argent	10,4	Carbone :		Liège	0,3
Cuivre	8,9	(diamant)	3,5	Caoutchouc	0,9
Fer	7,8	Phosphore	1,8	Glace	0,9
Aluminium	2,6				
Sodium	0,97				

C. MESURES DE LA MASSE VOLUMIQUE DES LIQUIDES

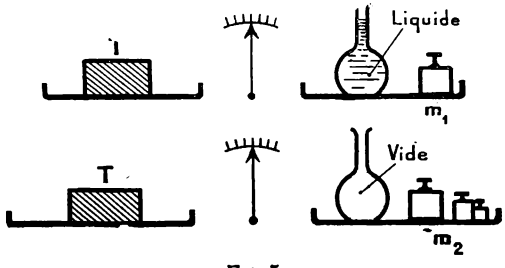


FIG. 5.

9. MÉTHODE RAPIDE. — La masse se détermine à la balance, et le volume peut se lire directement à l'aide d'un vase jaugé. La figure 5 schématise les opérations :

Une fiole jaugée dont le volume est V, remplie du liquide, puis vide, intervient dans les deux équilibres.

La masse du liquide est (par double pesée) : $m = m_2 - m_1$ et le poids volumique est :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Pour une mesure plus précise on utilise la *méthode du flacon.*

10. MÉTHODE DU FLACON. — La méthode rappelle celle que nous avons étudiée pour les solides :

a) **Flacon.** — De forme plus allongée, le flacon (fig. 1 et 6) est muni d'un col étroit par où on peut cependant introduire le liquide. Le col porte un *trait de repère* R.

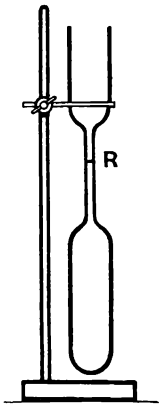


FIG. 6. — *Flacon à densité (liquides).*

b) **Expériences : 1. Premier équilibre.** — Emplissons le flacon du *liquide* jusqu'au niveau d'affleurement R. Essuyons le flacon extérieurement et portons-le sur le plateau d'une balance. Après avoir placé la tare, réalisons l'équilibre avec une masse m_1 (fig. 7, *a*).

2. **Deuxième équilibre.** — Vidons le flacon et séchons-le intérieurement par un courant d'air chaud, par exemple, et extérieurement. Replaçons-le sur un plateau. Il faut alors une masse m_2 pour réaliser l'équilibre (fig. 7, *b*).

3. **Troisième équilibre.** — Emplissons le flacon d'*eau pure* jusqu'au repère R. Portons-le de nouveau sur le plateau de la balance et ajustons l'équilibre avec la masse m_3 (fig. 7, *c*).

La différence : $m_2 - m_1$ donne par double pesée la masse m du liquide.

La différence : $m_2 - m_3$ donne, par exemple, par double pesée, la masse (en grammes) de l'eau qui occupe le même volume; ce nombre est aussi le volume de l'eau (en cm³). Donc :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3}.$$

Comme pour les solides, la méthode du flacon permet des mesures de précision.

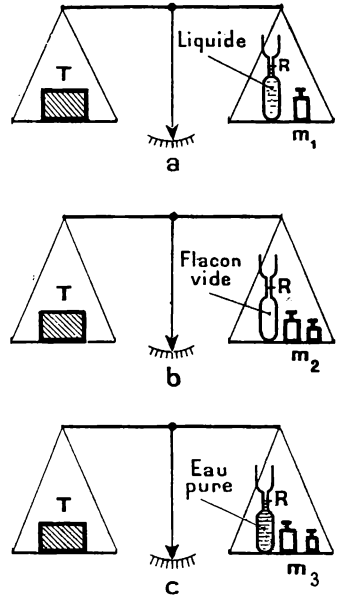


FIG. 7. — *Méthode du flacon : les 3 équilibres.*

11. RÉSULTATS. — Voici quelques résultats, pour des liquides à la température ordinaire (15° à 20°).

Masse volumique en g/cm³ (vers 15°)

Eau	$\rho = 0{,}999$ (1)	Huile	0,9
Mercure	13,6	Benzine	0,88
Acide sulf. concentré	1,8	Alcool	0,79
Lait	1,03	Ether	0,78
Eau de mer	1,026		

Nous verrons au chapitre 20 comment les masses volumiques des solides et des liquides dépendent de la température.

EXERCICES

1. Un cube de bois a comme arête 12 cm et pèse 953 gf. Quel est son poids volumique? Quelle est sa densité? Avec quelle erreur est connu le poids volumique si l'arête est connue à 1 mm près et le poids à 1 gf près? Rép. : $a = 0{,}55 \pm 0{,}014$ gf/cm³.

2. La densité du chlore est 2,5. Quel est le poids d'un litre de chlore mesuré dans les conditions où un litre d'air pèse 1,3 gf? Rép. : 3,25 gf.

3. Un fil cylindrique en cuivre a un diamètre de 6 mm. Quel est le diamètre d'un fil d'aluminium qui a le même poids au mètre courant? Densité du cuivre : 8,9; densité de l'aluminium : 2,6.

Rép. : 11,1 mm.

4. On verse un certain poids P d'eau pure dans un long tube cylindrique fermé à une de ses extrémités. Le tube est alors rempli sur une hauteur de 80 cm. On recommence la même opération avec un même poids d'un liquide L qui remplit le tube sur une longueur de 92 cm. Quel est la masse volumique de L? Sachant que P = 100 gf quel est le rayon du tube? Rép. : 0,87 g/cm³; 0,63 cm.

5. Une bague pèse 25,20 gf. Quand on la plonge dans une éprouvette graduée contenant de l'eau, elle déplace 2,3 cm³ du liquide. Cette bague est-elle en or? Rép. : non.

6. On fait un alliage en fondant 40 g d'or et 60 g d'argent. Quelle est sa densité?

On fait un alliage en fondant 40 cm³ d'or et 60 cm³ d'argent. Quelle est sa densité?

(On admettra que la fusion ne modifie pas le volume total des corps fondus.)

Rép. : 12,76; 13,96.

7. Une tare T équilibre un vase plein d'eau jusqu'à un repère et une masse $m_1 = 99{,}58$ g. On ajoute à côté du vase un solide S. L'équilibre est établi en remplaçant m_1 par $m_2 = 68{,}58$ g.

On immerge S dans le vase et on rétablit l'affleurement.

L'équilibre est réalisé en remplaçant m_2 par $m_3 = 78{,}88$ g.

Quelle est la densité du solide? Rép. : 3,0.

8. Le tube d'un flacon à densité a un diamètre intérieur de 1 mm au niveau du repère. Sachant que le volume du solide dont on mesure le poids volumique est de l'ordre de 6,3 cm³ et que l'affleurement peut être ajusté à 1 mm près, quelle erreur relative en résulte-t-il dans la mesure?

Rép. : erreur relative $\simeq \frac{1}{8\,000}$.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 14. Densité d'un solide (méthode du flacon).

N° 15. Densité d'un liquide (méthode du flacon).

(1) Dans les calculs et mesures de moyenne précision, on prend : $\rho = 1$ g/cm³

STATIQUE DES FLUIDES

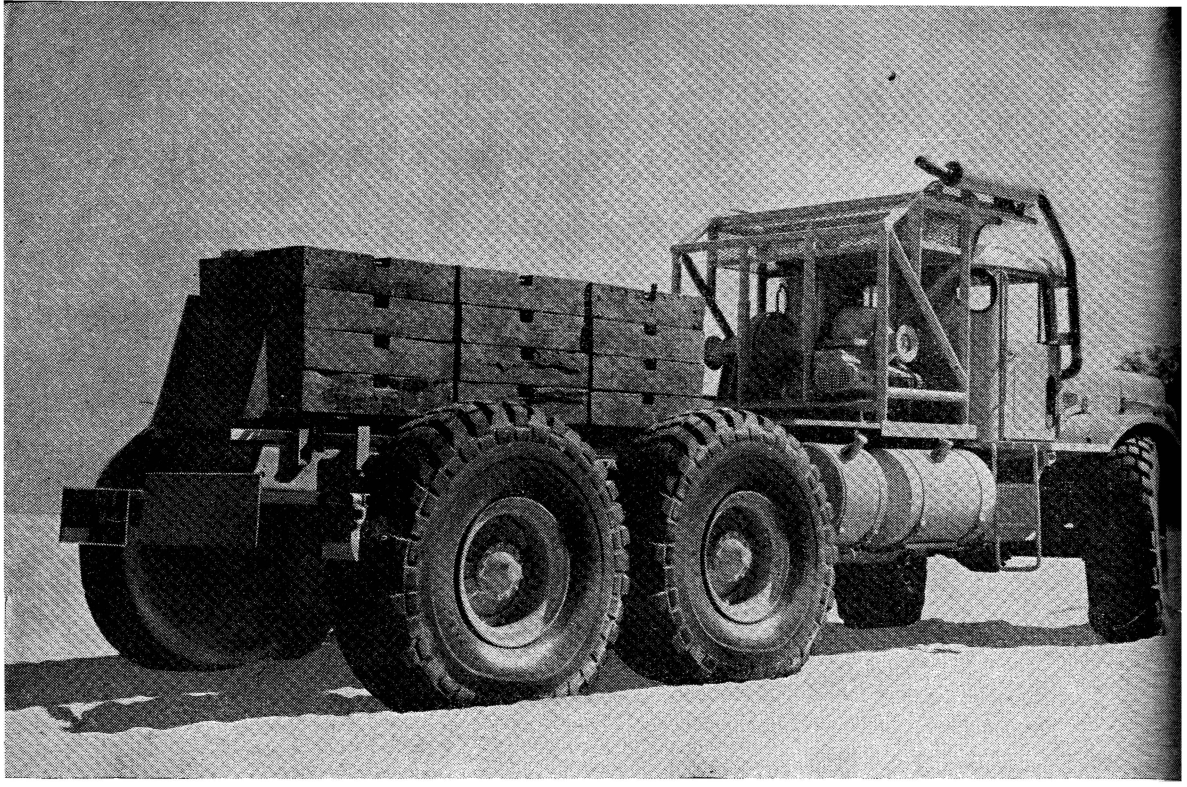


Photo Michelin.

FIG. 1. — Le **poids** de ce véhicule saharien est considérable, mais la **surface** de contact sur le sable est grande. La **pression** sur le sol reste inférieure à celle que fournit sous la semelle de ses chaussures un homme debout.

11. PRESSIONS

A. PRESSIONS CRÉÉES PAR LES SOLIDES

1. NOTION DE PRESSION. — Sur un corps déformable, par exemple une membrane élastique horizontale tendue sur un cadre (fig. 2) déposons une brique, de poids $\vec{F}$, qui entre en contact par sa plus large face AB; la membrane se *déforme*. C'est le poids de la brique qui provoque cette déformation, car si nous supprimons cette force la membrane reprend sa forme plane initiale.

Plaçons la brique sur sa plus petite face BC. Là où s'exerce le contact la déformation de la membrane est maintenant plus accusée.

L'effet de la force $\vec{F}$ est donc différent selon la surface de contact sur laquelle elle se répartit. Nous dirons que la brique exerce, dans les deux cas, des **pressions** différentes.

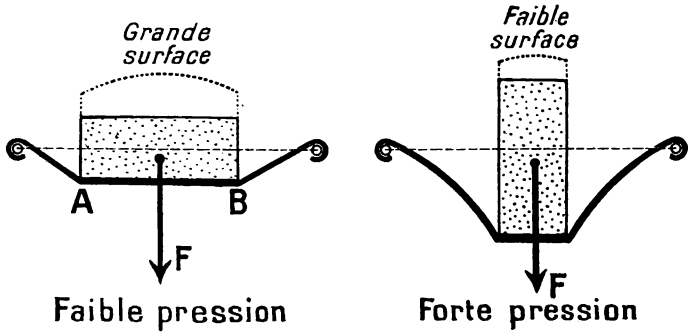


FIG. 2. — *Des pressions différentes provoquent des déformations différentes sur un corps élastique.*

Définition : ***Quand une force d'intensité F se répartit uniformément sur une surface S on nomme pression une grandeur p dont la mesure est le quotient des nombres mesurant la force et la surface.***

$$p = \frac{F}{S}.$$

Remarque. — Ayant précisé cette définition il importe désormais d'éviter toute confusion entre les notions de *force* et *pression*. Ce sont deux grandeurs distinctes. Nous pourrons dire que la pression est numériquement égale au quotient de la *force pressante* par la *surface pressée*.

2. UNITÉS DE PRESSION. — Elles dérivent des unités habituelles de force et de surface. Les plus employées sont rassemblées dans le tableau suivant :

FORCE	SURFACE	PRESSION
kgf	cm^2	kgf/cm^2
N	m^2	N/m^2
dyne	cm^2	$dyne/cm^2$ (ou *barye*).

Leurs définitions sont immédiates :

— *le* ***kilogramme-force par centimètre carré*** *est la pression exercée par une force de 1 kilogramme-force répartie uniformément sur 1 centimètre carré.*

— *le* ***newton par mètre carré*** *est la pression exercée par une force de 1 newton répartie uniformément sur 1 mètre carré.*

— *la* ***barye*** *est la pression exercée par une force de 1 dyne répartie uniformément sur 1 centimètre carré.*

Exemple numérique : *Un livre, dont le poids est 500 gf, appuie sur une table par une face rectangulaire de dimensions 22 × 15 cm. Exprimer la pression qu'il exerce sur la table.*

La force pressante est F = 0,5 kgf; la surface pressée est S = 22 × 15 = 330 cm². La pression est donc :

$$p = \frac{0,5}{330} \simeq 0,0015 \text{ kgf/cm}^2$$

ou

$$p = \frac{0,5 \times 9,81}{0,0330} \simeq 149 \text{ N/m}^2$$

ou encore

$$p = \frac{500 \times 981}{330} \simeq 1\,490 \text{ baryes.}$$

3. EFFETS DES PRESSIONS.

COMPRESSIBILITÉ. — Certains corps, soumis à des forces pressantes, subissent des variations de volume; quand la pression augmente, le volume diminue. On dit qu'ils sont *compressibles.* C'est d'ailleurs ce terme que nous avons employé en décrivant l'observation journalière des états de la Matière (Leçon 2) pour exprimer, par exemple, que le volume des *gaz* varie notablement quand on cherche à enfoncer un piston derrière lequel ils se trouvent enfermés. Les *solides,* par contre, formés de particules serrées les unes contre les autres et liées entre elles par une forte cohésion, sont *incompressibles.*

TRANSMISSION DES FORCES PAR LES SOLIDES. — Supposons que la main appuie sur la table en exerçant son effort par l'intermédiaire de quelques solides (I) (II) (III)... (fig. 3). La force $\vec{F}$ exercée par la main se transmet totalement, intégralement, de la main à la tige (I), de cette tige au cône (II), puis au cylindre (III), enfin à la table. Mais alors que la force conserve ses caractères : ligne d'action, sens, grandeur, chacun des solides « transmetteurs » reçoit une *pression* qui dépend de la surface pressée : ***S,*** ou ***S'***, ou ***S''***, et de la force pressante appliquée à cette surface : ici la force ***F,*** augmentée du poids des solides intermédiaires placés au-dessus de lui. Ainsi ***les solides transmettent intégralement les forces, mais non les pressions qu'ils reçoivent.*** Nous allons voir les conséquences de cette propriété.

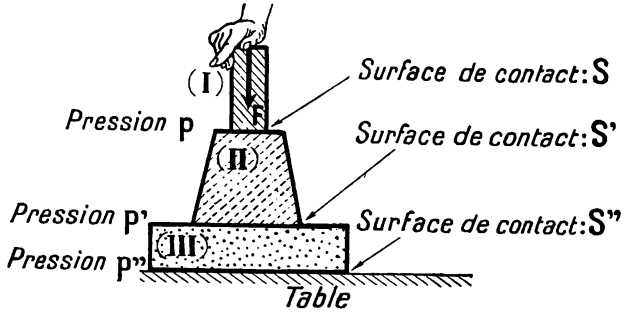


FIG. 3. — *Les solides transmettent les* ***forces*** *mais non les* ***pressions.***

RECHERCHE DES FAIBLES PRESSIONS. — Quand on veut éviter les déformations, on a intérêt à répartir les forces sur de grandes surfaces. Ainsi : les statues lourdes ont un *socle large;* les édifices importants construits sur un terrain non tassé reposent sur des *piliers* à base étendue; les *skis* empêchent d'enfoncer dans la neige; les lourds véhicules, ou ceux qui transportent de lourdes charges sont munis de *chenilles* ou de pneumatiques *nombreux* et *larges* (fig. 1); les larges bretelles des sacs de montagne évitent une pression locale trop pénible à supporter par les épaules.

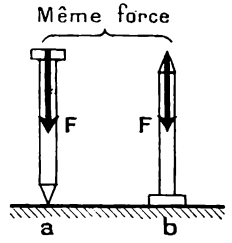


FIG. 4. — *En b, grande surface de contact : faible pression. En a, faible surface : grande pression.*

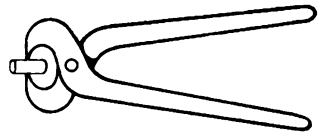


FIG. 5. — *Pince coupante.*

RECHERCHE DES FORTES PRESSIONS. — Au contraire, il est quelquefois utile de réaliser une déformation sans employer une force excessive. Cette force doit alors s'exercer sur une très faible surface. Les *lames de couteau*, les *haches* doivent être bien affûtées; à l'aide d'un *fil* fin, on coupe aisément le savon, le beurre; une *pointe* soumise à la même force F s'enfonce aisément si elle est placée dans le sens indiqué par la figure *4 a*; elle ne s'enfonce plus si on agit comme en *4 b*.

Dans les *pinces coupantes* (fig. 5) on augmente la pression $\frac{F}{S}$ en agissant à la fois sur les deux termes F et S. La force active F est multipliée par un système de leviers (Exercice n° 7); la surface S est diminuée en donnant aux mâchoires une forme de biseau aigu.

B. PRESSIONS DANS LES FLUIDES

Les particules qui forment les fluides (liquides et gaz) n'ont pas, entre elles, les liens de cohésion des solides. Elles sont libres de se mouvoir les unes par rapport aux autres, à peu près indépendantes les unes des autres (au moins dans les gaz) et, de plus, animées de mouvements désordonnés, effectués à des vitesses généralement très grandes.

4. EXPLICATION DES PRESSIONS CRÉÉES PAR LES FLUIDES.

1. Expérience (fig. 6). — Sur le plateau d'une balance disposons un bloc d'acier dur (ou de verre) que nous équilibrons en chargeant l'autre plateau. Par un tube incliné amenons au-dessus du bloc des billes d'acier (ou de verre) que nous laissons tomber et qui *rebondissent* après un choc très bref. Si les chocs successifs se font à de *très courts intervalles de temps*, nous observons que la balance prend une inclinaison constante, comme si

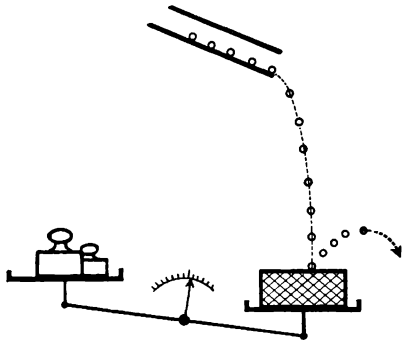


FIG. 6. — *Image de la pression creee par les particules d'un fluide.*

le poids du bloc était augmenté pendant qu'il reçoit les projectiles. Ainsi *des chocs très nombreux, répétés à une cadence très rapide, produisent sur un obstacle solide des effets comparables à ceux des forces qui agissent de façon continue.*

2. Pression en un point (fig. 7). — Il en est bien ainsi pour les fluides. Dans l'eau placée dans un flacon, dans l'air contenu dans un ballon, les molécules, en perpétuelle agitation, viennent heurter les parois solides qu'elles rencontrent. Que le degré de « tassement » des molécules soit grand, comme dans les liquides, ou faible, comme dans les gaz (Leçon 1, § 6), ces projectiles moléculaires bombardent sans arrêt les surfaces solides.

Imaginons donc une très petite surface solide, plane, de grandeur S, plongée dans un liquide (fig. 7, *a*) ou dans un gaz (fig. 7, *b*). Une de ses deux faces, la face supérieure par exemple, reçoit, au même instant, une grêle de particules en nombre extrêmement élevé, frappant au hasard de leur trajectoire. Si le fluide est en « état de repos » [1] les chocs viennent de toutes les directions, avec toutes les vitesses possibles. Il en résulte une véritable force pressante continue f et, en tenant compte de la multitude des chocs venant au même instant d'une multitude de directions, on comprend que cette force doit, par raison de symétrie, être *normale à la surface solide* frappée.

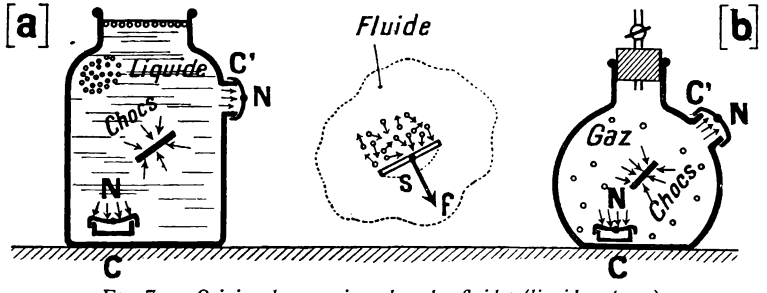


FIG. 7. — *Origine des pressions dans les fluides (liquides et gaz).*

Il en résulte une pression *moyenne* : $p_m = \frac{f}{S}$. Mais les grandeurs moléculaires sont si petites qu'on peut donner à S une valeur elle-même extrêmement petite. Il est alors légitime de parler de la pression créée par le fluide *au point* M, centre de la surface rencontrée.

---

(1) Dès la première leçon sur les *États de la Matière* (Leçon 2) nous avons fait la distinction entre l'état de *repos* ou d'équilibre, dans lequel les particules du fluide n'ont que des *mouvements incohérents* dans toutes les directions et l'état de *mouvement*, dans lequel à ce fourmillement désordonné se superpose un *déplacement d'ensemble* d'un même côté.

D'ailleurs, si le solide plat que nous avons imaginé est baigné par le fluide sur ses deux faces, la face inférieure reçoit, normalement, une force égale et opposée à ***f;*** il est alors impossible de s'apercevoir de l'existence de la pression en ***M.*** Mais on peut éliminer l'action du fluide sur une des deux faces, en introduisant par exemple dans ce fluide une petite boite ***C,*** fermée par un couvercle étanche et déformable, ou encore en remplaçant une portion de la paroi du récipient par une membrane, telle que ***C'.*** On réalise ainsi, autour d'un point ***N,*** un petit élément de surface frontière déformable dont les deux faces ne sont pas en contact avec le même fluide, et dont les changements de forme renseignent sur la pression créée en ***N*** soit par le liquide, soit par le gaz.

En résumé, dans les *fluides* en équilibre :

a) *En tout point existe une* ***pression locale,*** due aux chocs particulaires, et mesurant en quelque sorte l'efficacité de ces chocs sur une paroi solide très petite placée en ce point.

b) Les effets de la pression locale ne s'exercent pas dans une direction privilégiée, mais se font sentir *en toutes directions et tous sens* avec la même intensité. La pression ne dépend donc que du point considéré : ***à chaque point, sa pression.***

c) La *force pressante* qui en résulte sur une petite portion de surface solide située autour d'un point est ***normale à cette surface*** [1].

Ces conclusions sont valables à la fois pour les liquides et pour les gaz, mais dans les prochains chapitres, où nous étudierons la Statique des liquides, ou *Hydrostatique,* et la Statique des gaz, ou *Aérostatique,* nous constaterons qu'il existe, entre ces deux catégories de fluides, à côté de multiples analogies, d'importantes différences. Ces distinctions seront observées parce que les liquides sont pratiquement incompressibles (état condensé de la matière) alors que les gaz sont très compressibles (état dispersé).

---

(1) La force pressante, comme toute force, n'est complètement déterminée que si on se donne ses 4 éléments : point d'application, direction, sens, intensité; c'est une grandeur ***vectorielle.*** Pour connaître complètement la pression, il suffit de se donner le nombre qui la mesure; c'est une grandeur ***scalaire.***

EXERCICES

1. Un char de combat a une masse de 60 tonnes; chacune des deux bandes de roulement a 4 m de long sur 50 cm de large. Quelle pression exerce-t-il sur le sol? Rép. : 1,5 kgf/cm².

2. Les deux bases d'un tronc de cône ont respectivement pour rayons 2 cm et 10 cm. Reposant sur sa petite base, il exerce une pression de 2 kgf/cm². Quelle pression exerce-t-il reposant sur la grande base? Rép. : 0,08 kgf/cm².

3. Quel est l'ordre de grandeur de la pression exercée sur la neige par un skieur (on adoptera des nombres raisonnables pour faire le calcul)?

Comparer à la pression exercée par un homme immobile sur les pieds.

4. On admettra qu'une bicyclette pesant 15 kgf, montée par un cycliste de 60 kgf repose sur le sol par une surface de 3 cm × 10 cm sous chaque pneu. Quelle est la pression de gonflage des pneus si on admet que la charge est répartie ainsi : $\frac{1}{3}$ sur la roue avant, $\frac{2}{3}$ sur la roue arrière?

Rép. : 0,83 kgf/cm² et 1,67 kgf/cm².

5. Quelle serait la pression exercée par une bille parfaitement sphérique sur un plan si la bille ou le plan ne se déformaient pas légèrement?

6. La Tour Eiffel pèse 7×10^6 kgf et repose sur 4 piliers dont chacun s'appuie au sol par une surface de 540 m². Quelle est en kgf/cm² la pression supportée par le sol? Rép. : 0,32 kgf/cm².

7. Une pince coupante est constituée comme l'indique la figure 8.

On exerce en A une force F = 10 kgf. Quelle

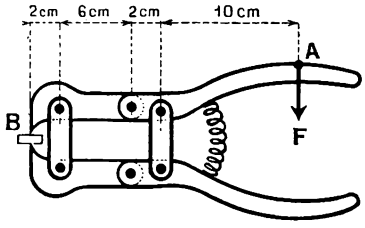


FIG. 8.

est la pression exercée en B si les mâchoires appuient en B sur une surface de 2 mm²?

Rép. : 7 500 kgf/cm²

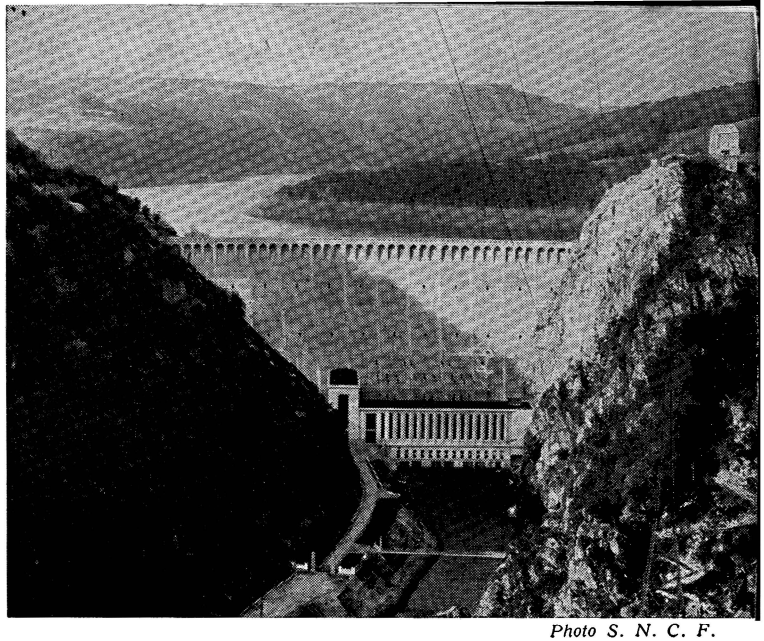


Photo S. N. C. F.

FIG. 1. — *L'eau retenue par un barrage représente une énorme masse liquide en équilibre. La pression exercée à la base peut être considérable (Barrage de Sarrans).*

Les liquides pèsent suivant leur hauteur.
PASCAL.

12. PRINCIPE FONDAMENTAL DE L'HYDROSTATIQUE

L'**Hydrostatique** étudie les propriétés des liquides en équilibre, c'est-à-dire au repos.

1. LIQUIDE IDÉAL.

Expériences :

1. Emplissons d'eau un flacon à trois ouvertures dont deux sont fermées par de très *minces* membranes de caoutchouc ***a*** et ***b*** (fig. 2). Nous voyons que ces membranes s'incurvent vers l'extérieur. Leur déformation indique qu'elles subissent des forces pressantes $\vec{F}$ et $\vec{F'}$ dirigées de l'intérieur vers l'extérieur du récipient. Leur renflement en calotte de forme symétrique suggère que ces forces sont normales aux surfaces obturées par les membranes, pour toutes les orientations de ces surfaces.

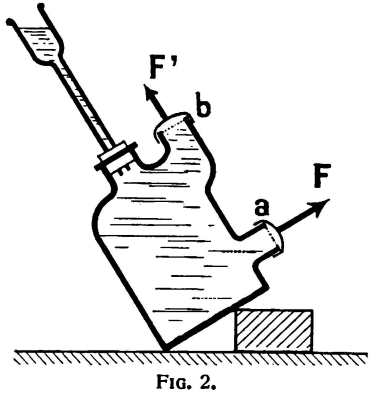


FIG. 2.

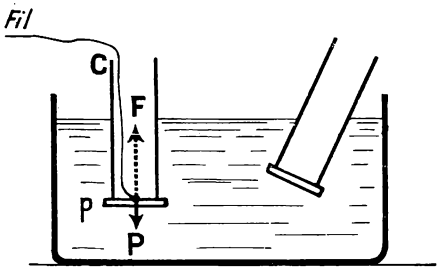


FIG. 3.

2. Dans une cuve remplie d'eau calme (fig. 3) plongeons un tube cylindrique en verre *C*, dont le fond, rodé, peut être obturé par une petite plaquette de verre *p*, plane, légère, mobile, qui s'y adapte bien mais peut glisser à son contact sans frottement appréciable. Enfonçons le tube verticalement, la plaquette étant maintenue en place par un fil, puis lâchons le fil : la plaquette ne tombe pas. Or son poids $\vec{P}$ est une force verticale. Si elle ne tombe pas c'est qu'elle reçoit de la part de l'eau une *force pressante*, $\vec{F}$ supérieure au poids, et elle-même *verticale et orientée vers le haut.* Si $\vec{F}$ était oblique, elle admettrait une composante horizontale qui, les frottements étant négligés, ferait glisser la plaquette horizontalement et déboucherait le tube.

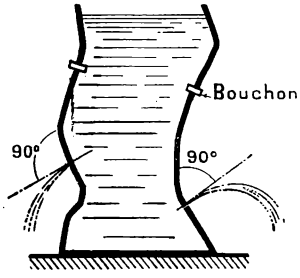


FIG. 4.

Dans une position inclinée, pourvu que son poids soit assez faible, la plaquette reste également appliquée contre le cylindre sans le secours du fil. *Nous admettrons* encore que les forces pressantes, dont la résultante est supérieure au poids de la plaquette, sont normales à son plan et n'entraînent aucun glissement latéral.

On peut également réaliser la simple expérience suivante qui, bien qu'assez suggestive, est d'une interprétation beaucoup moins rigoureuse.

Une boîte métallique, bosselée, remplie de liquide, porte quelques trous obturés par des bouchons (fig. 4). Le liquide étant au repos, débouchons un trou quelconque; le jet qui en résulte part *normalement à la paroi.*

On peut admettre que la force qui expulse les particules liquides était, avant le mouvement, c'est-à-dire dans le liquide au repos, normale à la paroi.

Toutes ces observations, qu'on pourrait multiplier sous d'autres formes, confirment ce que nous avons indiqué déjà sur la constitution des liquides au repos et sur l'existence des pressions au sein des liquides. Cependant les expériences précédentes sont encore trop imparfaites pour vérifier avec précision que dans tous les cas les forces pressantes sont normales aux surfaces solides pressées. Nous admettrons qu'il en est ainsi dans tout liquide *idéal*, forme de la matière qui représente au mieux l'état liquide. La propriété suivante devient donc fondamentale :

Un liquide* parfait, *en équilibre, exerce sur les parois solides immergées des forces pressantes* normales *aux parois.

La plupart des liquides présentent ce caractère : l'eau, l'alcool, la benzine, l'éther, etc. Ce sont eux que nous utiliserons dans les chapitres suivants.

Demandons-nous maintenant de quels facteurs dépendent les pressions dans les liquides.

2. LA CAPSULE MANOMÉTRIQUE. — Nous savons qu'une *même* pression, agissant sur la *même* surface d'une membrane élastique provoque la *même* déformation de cette membrane. Construisons alors l'appareil suivant (fig. 5).

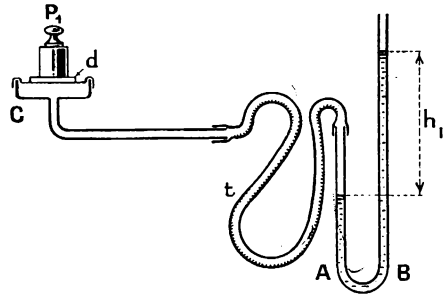


FIG. 5. — *Capsule manométrique.*

Une petite boîte métallique *C* fermée par une *mince* feuille de caoutchouc est en communication par l'intermédiaire d'un tuyau souple ***t*** avec la branche *A* d'un tube en *U* contenant un liquide.

Quand la membrane est plane et tendue, le niveau du liquide coloré est le même en A et en B.

Par l'intermédiaire d'un petit disque d'aluminium très léger ***d***, appliquons sur la membrane des pressions croissantes, en la chargeant de poids croissants $\boldsymbol{P_1}$, $\boldsymbol{P_2}$, $\boldsymbol{P_3}$... qui s'exercent sur la même surface du disque. Nous observons les dénivellations croissantes $\boldsymbol{h_1}$, $\boldsymbol{h_2}$, $\boldsymbol{h_3}$... dans le tube en U.

L'appareil est beaucoup trop imparfait pour servir à des *mesures*; il nous permettra cependant :

1° de reconnaître des pressions *égales* (égalité des hauteurs *h*);

2° de reconnaître une pression $\boldsymbol{P_2}$ *supérieure* à une pression $\boldsymbol{P_1}$ ($h_2 > h_1$).

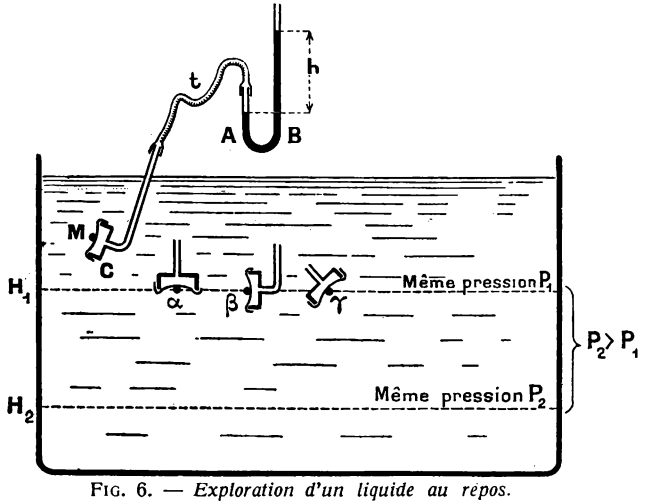


FIG. 6. — *Exploration d'un liquide au repos.*

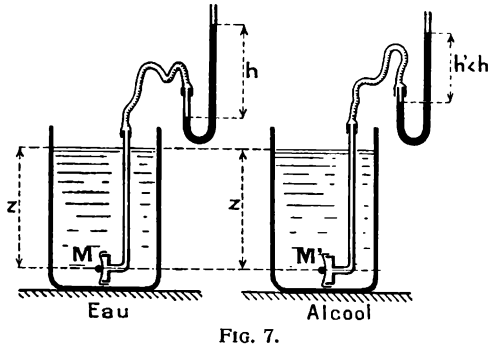


FIG. 7.

3. EXPLORATION DES LIQUIDES AU REPOS.

a) Plaçons le centre de la capsule au point M (fig. 6). Nous observons une dénivellation h. Changeons l'orientation de la membrane tout en maintenant son centre en M : h reste constant. Donc :

Au sein d'un liquide au repos, la pression en un point s'exerce avec la même valeur en tous les sens.

b) Déplaçons la capsule en explorant le plan horizontal H_1. Quelle que soit l'orientation de la membrane, dans les positions α, β, γ, la différence h_1 des niveaux du liquide dans les branches A et B reste constante. Donc :

Au sein d'un liquide au repos, la pression est la même en tous les points d'un même plan horizontal.

c) Explorons un autre plan horizontal H_2, au-dessous de H_1. Nous notons une hauteur $h_2 > h_1$. Donc :

Au sein d'un liquide au repos, la pression augmente avec la profondeur.

d) Comparons les pressions pour deux points situés à la même profondeur dans deux liquides différents : eau (poids volumique : 1 gf/cm³) et alcool (poids volumique : 0,8 gf/cm³). Les résultats sont indiqués par la figure 7. On observe :

$$h_{\text{(eau)}} > h'_{\text{(alcool)}}.$$

A la même profondeur, dans plusieurs liquides au repos, les pressions sont plus grandes dans les liquides les plus denses.

4. PRINCIPE FONDAMENTAL DE L'HYDROSTATIQUE. — La proposition suivante, ou *Principe fondamental de l'Hydrostatique*, précise comment varie la pression en fonction de la profondeur et de la nature du liquide (fig. 8) :

> PRINCIPE : ***La différence des pressions en deux points A et B d'un liquide en équilibre est numériquement égale au poids d'une colonne de ce liquide ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance des deux plans horizontaux contenant A et B.***

Pour traduire le Principe par une formule utilisable, il faut choisir des unités concordantes. Or une colonne de base unité ***(1)*** et de hauteur h a pour volume $1 \times h$ Si ϖ désigne le poids volumique du liquide, le poids de la colonne est $\varpi \times 1 \times h$. Par suite, en précisant les unités de mesures que nous utiliserons le plus souvent :

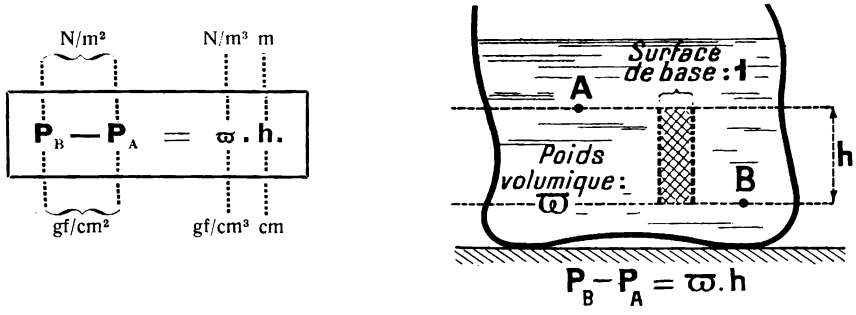


FIG. 8.

Remarque. — Il faut bien noter que le Principe fondamental ne permet pas de calculer la pression en un point du liquide; il donne seulement la *différence de deux pressions*. Si on envisage deux points ***A*** à l'intérieur d'un liquide et ***S*** sur la surface de séparation du liquide avec l'air (surface libre), on peut toujours écrire :

$$P_A - P_S = \varpi . h.$$

Or P_S n'est pas une pression nulle, car *l'air, autre fluide, exerce au point S une pression, la pression atmosphérique*, que nous étudierons plus loin.

Nous admettrons ici que l'atmosphère, située au-dessus des surfaces libres d'un ou de plusieurs liquides, exerce, *au même instant, en tous les points de ces surfaces, des pressions égales*. C'est du moins ce qui a lieu si les différents points envisagés ne sont pas trop éloignés les uns des autres, dans une même salle, par exemple.

Moyennant cette remarque, nous pourrons alors dire que dans l'eau d'un seau, à 30 centimètres de profondeur, la pression **due à l'eau** est 30 gf/cm³. Si on voulait obtenir la pression réelle, il faudrait ajouter à ce nombre le nombre exprimant la pression atmosphérique.

Exemple de calcul numérique : *Une éprouvette contient du mercure sur une hauteur de 10 cm. Quelle est la différence des pressions entre les niveaux inférieur et supérieur? Quelle serait la différence d'altitude de deux points d'un récipient rempli d'alcool entre lesquels on aurait la même différence de pression? Poids volumiques : mercure : 13,6* gf/cm³; *alcool : 0,8* gf/cm³.

Deux points *B* à la base et *A* au sommet de la colonne de mercure ont une différence de pression :

$$P_B - P_A = 13{,}6 \times 10 = 136 \text{ gf/cm}^2.$$

Dans l'alcool, la dénivellation entre les deux points serait *h*, telle que

$$136 = 0{,}8 \times h$$

$$\mathbf{h = 170 \text{ cm}.}$$

On peut faire reposer toute l'Hydrostatique sur le Principe fondamental. Un tel principe *ne se démontre pas*; sa validité est établie par les conséquences qui en découlent, que l'expérience vérifie chaque jour.

Il nous conduira, par la voie de raisonnements logiques, à d'autres propositions qu'on appelle, en langage habituel : *Principe* des vases communicants, *Principe* de

Pascal, *Principe* d'Archimède, etc. Sans rien perdre de leur valeur pratique, ces affirmations se présenteront alors comme de simples *théorèmes.*

Il est important en Physique de ne pas abuser du mot Principe.

EXERCICES

(On ne tiendra pas compte de la pression atmosphérique.)

1. Une capsule manométrique est constituée par une boîte cylindrique de 4 cm de diamètre.

Quelle pression reçoit le centre de la membrane immergée à 25 cm au-dessous du niveau de l'eau?

A quelle force est soumise la membrane?

Quelle serait cette force si l'eau était remplacée par de l'eau salée pesant 1 020 gf par litre?

On admettra que la pression en chaque point de la membrane est la même qu'au centre.

Rép. : 25 gf/cm²; 314 gf; 320 gf.

2. Quelle force l'eau exerce-t-elle sur la vitre du casque d'un scaphandre dont la surface est 200 cm², à 12 m de profondeur, en eau douce?

Rép. : 240 kgf.

3. Un cube d'arête verticale égale à 15 cm est immergé dans l'huile de densité 0,9. Le centre C d'une face verticale est à 20 cm de la surface horizontale de l'huile.

Quelle est la pression en C?

Quelle est la différence des pressions supportées par les deux faces horizontales?

Cette différence dépend-elle de la profondeur du point C? Rép. : 18 gf/cm²; 13,5 gf/cm²; non.

4. Expliquer pourquoi les infiltrations d'eau dans les parois rocheuses d'un barrage sont plus à craindre à la base qu'au sommet?

5. Un tube de 1 m de long incliné à 45° sur l'horizontale est rempli au $\frac{1}{4}$ de sa hauteur par du mercure et au-dessus par de l'eau.

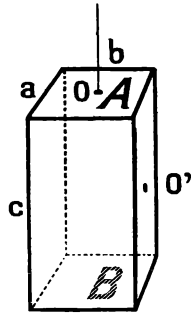
Tracer le graphique des variations de la pression P due aux liquides en fonction de la distance x de chaque point intérieur au sommet du tube. Échelle : Ordonnées : 100 gf/cm² seront représentés par 2 cm. Abscisses : 1 m sera représenté par 10 cm. Densités de l'eau : 1, du mercure : 13,6.

6. Un tonneau d'axe horizontal a dans sa partie la plus large un diamètre de 1,2 m. Il est rempli de vin dont la densité est 0,98. Un bouchon cylindrique de diamètre 3 cm ferme un orifice situé dans le plan vertical contenant l'axe et à 40 cm au-dessous de cet axe.

Quelle doit être la résultante des forces de frottement du bouchon dans l'ouverture pour qu'il n'y ait pas de fuite. Rép. : $\simeq$ 690 gf.

PROBLÈME

1° Un parallélépipède solide homogène dont les arêtes sont $a = 2$ *cm*, $b = 3$ *cm*, $c = 20$ *cm* est suspendu par le milieu O d'une



petite face A sous le plateau d'une balance. Pour maintenir l'équilibre, il faut alors enlever de ce plateau des masses marquées dont la somme est 1 025 g. Calculer la masse volumique du solide.

2° Le solide est ensuite entièrement immergé dans l'eau d'une cuve. On constate que, pour maintenir l'équilibre de la balance, il faut ajouter sur le plateau qui soutient le fil des masses marquées dont la somme est m. Expliquer pourquoi.

Les faces A et B étant horizontales et la face A à 10 cm de la surface de l'eau, calculer les forces appliquées à A et B. On admettra que l'atmosphère maintient en tout point de la salle une pression de 1 kgf/cm².

3° Calculer la masse m. Montrer qu'elle serait la même si le fil de suspension était attaché au centre O' d'une grande face. Serait-elle modifiée si le solide était enfoncé davantage dans le liquide?

4° Le solide occupant la position de la deuxième question (face A à 10 cm au-dessous de la surface de l'eau), on le soulève lentement en tirant sur le fil, les faces A et B restant horizontales, jusqu'à ce que B émerge complètement. Calculer, en joules, le travail effectué par l'opérateur.

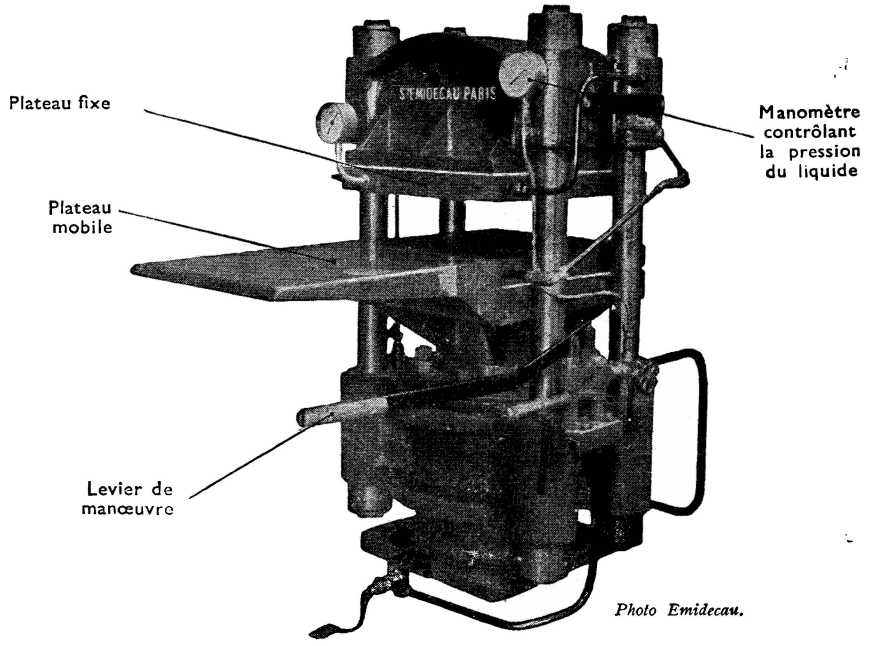


FIG. 1. — *Cette presse hydraulique, manœuvrée à la main, est capable de développer une force de* 100 000 *kgf.*

C'est la même chose de faire faire un pouce de chemin à cent livres d'eau, que de faire faire cent pouces de chemin à une livre d'eau.

PASCAL.

13. APPLICATIONS DU PRINCIPE FONDAMENTAL.

A. SURFACE DES LIQUIDES EN ÉQUILIBRE

1. LA SURFACE LIBRE D'UN LIQUIDE AU REPOS.

OBSERVATION. — Un fil à plomb traverse en A la surface de séparation entre l'air et l'eau au repos (fig. 2). Appliquons le long du fil le bord **AB** d'une équerre; l'autre côté **AC,** qui définit alors une *horizontale* passant par **A,** frôle la surface de l'eau. Si on fait tourner l'équerre autour du fil le côté **AB** balaie un plan horizontal pratiquement confondu avec la surface de séparation *air-eau*; donc :

La surface libre d'un liquide au repos est plane et horizontale [1].

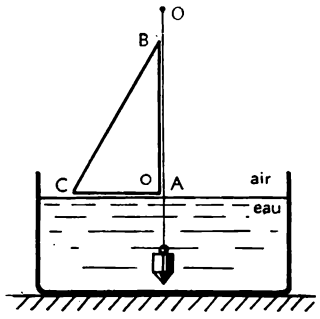


FIG. 2. — *La surface libre d'un liquide au repos est plane et horizontale.*

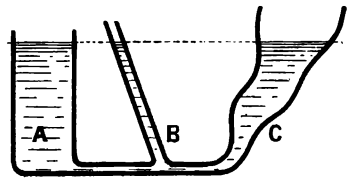


FIG. 3. — *Vases communicants.*

Ce résultat est indépendant de la forme du vase qui contient le liquide. Il reste vrai si le liquide au repos est réparti dans plusieurs *vases communicants* A, B, C... reliés entre eux (fig. 3). Chaque surface libre est alors une portion du même plan horizontal [2].

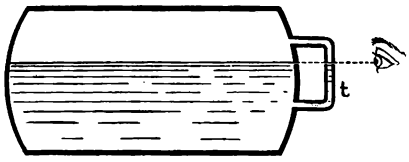


FIG. 4. — *Indicateur de niveau.*

Cette propriété des vases communicants a reçu de nombreuses applications.

a) **Indicateur de niveau** (fig. 4). — Cet appareil est destiné à repérer le niveau d'un liquide dans un récipient à parois opaques; le niveau intérieur et le niveau dans le tube de verre ***t*** sont identiques.

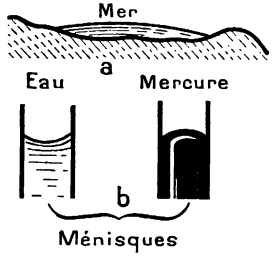


FIG. 5.

(1) Signalons deux exceptions :

(*a*) La surface libre est de *très grande étendue* (lac, mer...). On sait qu'elle présente alors la forme sphérique (courbure des océans) (fig. 5, *a*).

b) La surface libre est de *très faible étendue* (liquide occupant le canal intérieur d'un tube fin). Dans ce cas, la surface libre est encore courbe et affecte une forme appelée *ménisque* (fig. 5, *b*).

(2) Si l'un des vases communicants présente une partie *étroite* là où affleure le liquide, on observe une *ascension anormale* (eau, alcool, etc.) ou une *dépression anormale* (mercure).

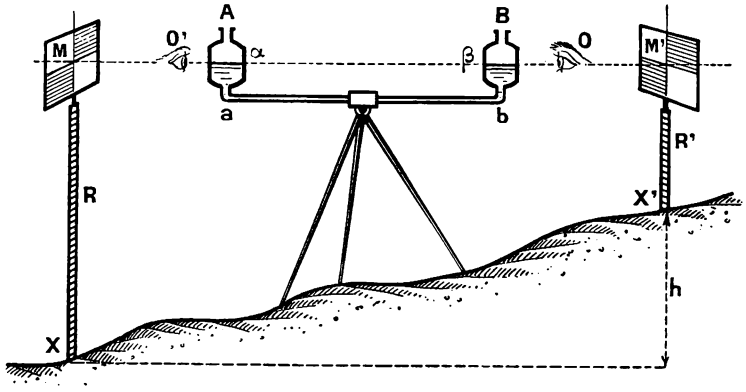


FIG. 6. — *Niveau d'eau.*

b) **Niveau d'eau** (fig. 6). — Dans cet instrument, un tube *ab* d'environ 1 m de longueur relie deux godets de verre *A* et *B* contenant de l'eau colorée. Les niveaux dans les deux fioles déterminent, quand le liquide est au repos, un plan horizontal.

Pour connaître la différence des niveaux de deux points *X* et *X'*, on installe l'appareil entre ces deux points, après avoir planté en *X* et *X'* deux règles verticales *R* et *R'* sur lesquelles peuvent coulisser deux *mires M* et *M'*. L'œil de l'arpenteur étant en *O* pour effectuer une visée, un aide amène le centre de la mire M dans le prolongement de l'horizontale $\alpha\beta$.

Sans toucher au niveau, l'arpenteur, l'œil en *O'*, vise de même à la mire *M'*. La différence des niveaux s'obtient directement par :

$$h = \mathrm{XM} - \mathrm{X'M'}.$$

c) **Distributions d'eaux urbaines** (fig. 7). — Un *réservoir* (château d'eau) situé en un point élevé de la ville est constamment rempli d'eau à l'aide de pompes. Par des canalisations, l'eau arrive jusqu'aux étages des immeubles. Au robinet ***r*** par exemple, l'eau est sous pression et sa pression est mesurée par une colonne d'eau de ***h*** mètres.

d) **Écluses** (fig. 8). — Deux **biefs,** le *bief aval* et le *bief amont,* communiquent avec un compartiment intermédiaire, le **sas**, par deux portes P_1 et P_2, munies de *vannes* V_1 et V_2, qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté.

Supposons qu'un bateau se présente pour passer l'écluse d'aval en amont (fig. 8, *a*).

a) V_1 étant alors fermée et V_2 ouverte, le sas et le bief aval forment deux vases communi-

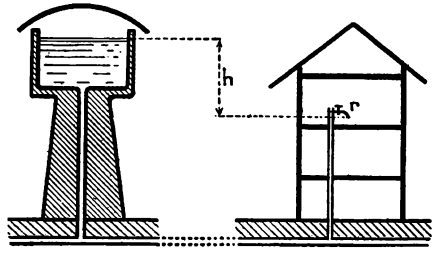


FIG. 7.

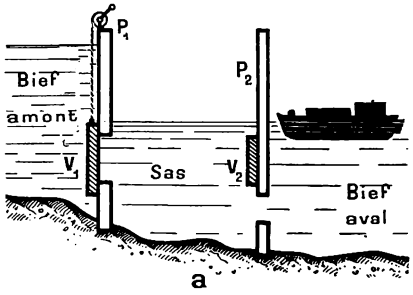


FIG. 8, *a*.

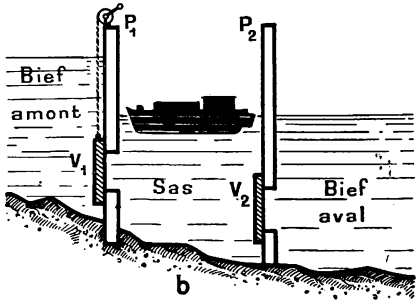


FIG. 8, *b*.

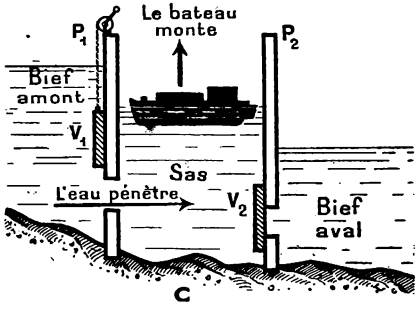


FIG. 8, *c*.

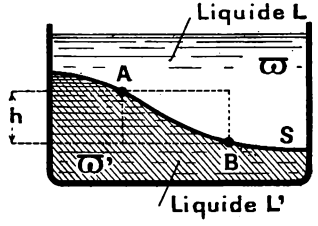


FIG. 9.

cants dans lesquels les niveaux sont les mêmes. On peut sans peine ouvrir la porte P_2 et le bateau pénètre dans le sas (fig. 8, *b*).

b) On ferme alors la porte P_2 et la vanne V_2; on ouvre la vanne V_1 et l'eau pénètre dans le sas, qui se remplit jusqu'à ce que son niveau soit le même que celui du bief amont (fig. 8, *c*).

c) Il ne reste qu'à ouvrir la porte P_1 ce qui se fait sans peine, et le bateau pénètre dans le bief amont.

Pour le trajet d'un bateau en sens inverse, il est facile d'imaginer la série des manœuvres à effectuer.

2. SURFACE DE SÉPARATION DE DEUX LIQUIDES NON MISCIBLES. — Soient deux liquides *non miscibles*, de poids volumiques ϖ et ϖ' (huile et eau, eau et mercure, etc.). Plaçons-les dans le même récipient. Nous constatons que le liquide le plus dense va au fond et que la surface de séparation est *plane* et *horizontale*.

Le Principe fondamental nous permet de prévoir ce résultat. Supposons que la surface S ne soit pas horizontale (fig. 9). Considérons deux points quelconques A et B de cette surface. Soit h la distance des deux plans horizontaux qui contiennent A et B.

A et B appartiennent au liquide $\boldsymbol{L}$. La différence des pressions qu'ils supportent est :

$$P_B - P_A = \varpi . h.$$

A et B appartiennent également au liquide $\boldsymbol{L'}$ et la différence des pressions qu'ils supportent est :

$$P_B - P_A = \varpi' . h$$

d'où :

$$\varpi h - \varpi' h = 0$$

$$(\varpi - \varpi')h = 0$$

comme

$$\varpi \neq \varpi', \qquad \boldsymbol{h = 0.}$$

Tous les points sont donc au même niveau et la ***surface de séparation de deux liquides non miscibles est plane et horizontale.***

3. VASES COMMUNICANTS AVEC DEUX LIQUIDES NON MISCIBLES. — Soient deux vases communicants contenant deux liquides non miscibles (huile et eau, par exemple) (fig. 10). On constate que les deux surfaces libres, en contact avec l'air, ne sont pas sur le même plan horizontal.

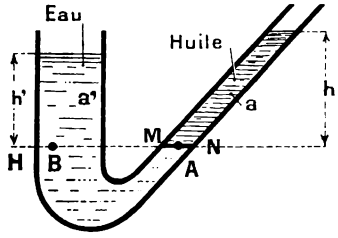


FIG. 10.

Prenons deux points A et B dans le plan horizontal H de la surface de séparation. Ils supportent les mêmes pressions; si on désigne par ϖ le poids volumique de l'huile, par ϖ' celui de l'eau, par $\mathbf{h}$ et $\mathbf{h}'$ les hauteurs verticales des surfaces libres au-dessus du plan H, on peut écrire :

$$P_A = P_B = \varpi' \mathbf{h}' = \varpi \mathbf{h}$$

d'où :

$$\frac{\boldsymbol{h}'}{\boldsymbol{h}} = \frac{\varpi}{\varpi'}$$

Les hauteurs verticales des liquides au-dessus de la surface de séparation sont en raison inverse des poids volumiques des liquides.

On peut baser sur cette propriété une méthode de comparaison des poids volumiques (T. P.).

B. PRINCIPE (ou THÉORÈME) de PASCAL

4. EXPÉRIENCE (fig. 11). — Prenons un flacon *entièrement rempli d'eau* (éliminer toute bulle d'air) et fermé par 2 bouchons. Frappons sur le bouchon B_1. Le bouchon B_2 est projeté. L'action exercée sur le bouchon B_1 s'est donc transmise *sous la surface inférieure de* B_2 par l'intermédiaire du liquide au repos. Voyons comment le principe fondamental de l'Hydrostatique permet de prévoir ce résultat.

Théorème : *Les liquides transmettent intégralement et en tous leurs points les variations de pression qu'ils subissent.*

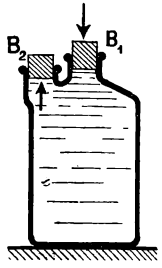


FIG. 11. — *Les liquides transmettent les pressions en tous sens.*

Soit un liquide *incompressible*, au repos, remplissant entièrement une enceinte indéformable (fig. 12).

Entre deux points A et B existe une différence de pression :

$$P_B - P_A = \varpi . h \qquad [1]$$

Par un moyen quelconque, augmentons la pression en A d'une valeur $\boldsymbol{p}$. La relation [1] reste vraie dans ce nouvel état. Il faut donc, $\boldsymbol{a}$ et $\boldsymbol{h}$ n'ayant pas changé, que B subisse lui-même un accroissement de pression égal à $\boldsymbol{p}$.

PASCAL (V. notices biographiques).

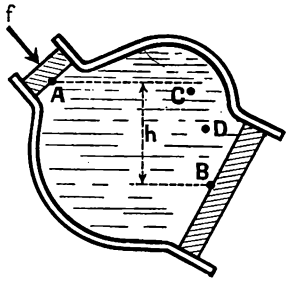


FIG. 12. — *Une augmentation de pression subie par* A *se transmet intégralement à* B, C, D....

Remarque I. — Cet accroissement de pression se transmet à tous les points du liquide, aussi bien en *C*, *D*...

Remarque II. — Il ne faudrait pas croire que le liquide transmet intégralement la *force* qu'a produit l'accroissement de pression. Si, par exemple, l'accroissement de pression en *A* a été obtenu en faisant agir une force $\vec{f}$ sur le petit piston, le grand piston ne reçoit pas la même *force*. ***Les forces transmises dépendent des surfaces mises en jeu.*** C'est ce que nous verrons au paragraphe suivant.

5. APPLICATION : PRESSE HYDRAULIQUE. — Dans cet appareil (fig. 13), on profite précisément de la transmission intégrale des pressions par les liquides pour obtenir une importante multiplication de la *force* pressante.

Deux **cylindres** *A* et *B* à parois très résistantes communiquent entre eux et sont entièrement remplis d'eau. Deux **pistons** de section ***S*** et ***s*** enferment hermétiquement le liquide.

Agissons sur le petit piston avec une force verticale $\vec{f}$ dirigée vers le bas.

Le point **a** du liquide reçoit une pression : $p = \frac{f}{s}$ et la transmet intégralement au point **b**. Il en résulte une force $\vec{F}$ normale à la paroi, donc dirigée verticalement vers le haut et égale à $p \times S$, soit :

$$F = \frac{f}{s} \times S = f \times \frac{S}{s}.$$

La force $\vec{f}$ se trouve donc *multipliée par le rapport* $\frac{S}{s}$ des surfaces des pistons. Si,

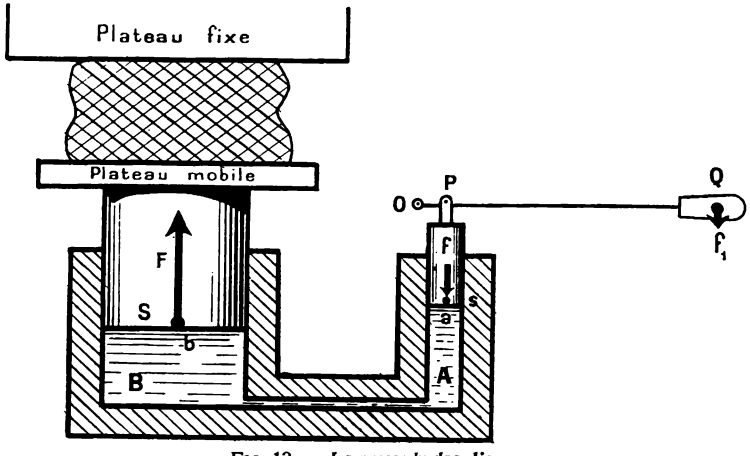


FIG. 13. — *La presse hydraulique.*

par exemple, les diamètres des pistons sont respectivement $d = 4$ cm et $D = 40$ cm, la force $f = 20$ kgf devient (le rapport des surfaces étant égal au rapport des carrés des diamètres) :

$$F = 20 \times \frac{^2}{d^2} = 20 \times 100 = 2\,000 \text{ kgf.}$$

La force $\vec{f}$ est toujours appliquée au petit piston par le jeu d'un **levier** dont le point d'appui est O. Si OQ $= 10 \times$ OP, on voit que la force f sera obtenue en agissant sur la poignée avec une force : $f_1 = \frac{f}{10} = 2$ kgf.

Au total, la combinaison d'un système de *levier mécanique* et du ***véritable levier hydraulique*** que constitue la presse hydraulique multiplie par 1 000 toute force appliquée au point Q.

La force F est utilisée pour comprimer ou déformer certains matériaux entre un **plateau fixe** et un **plateau mobile** soulevé par le grand piston.

On démontre aisément qu'il y a conservation du travail dans la presse hydraulique, comme dans toute combinaison de machines simples parfaites (Exercice 2).

La presse hydraulique est très employée dans l'industrie, car elle permet d'obtenir de très grandes forces avec une installation relativement simple. Elle sert à comprimer certaines marchandises encombrantes (pailles, coton...) à déformer des métaux (tôles), à presser des graines oléagineuses ou des fruits. La figure 1 donne l'aspect d'une presse hydraulique moderne.

Dans le **vérin hydraulique** le déplacement du petit piston est réalisé non à l'aide d'un levier, mais à l'aide d'une *vis*. Les forces obtenues sont considérables (quelques milliers de kilogrammes-force).

6. FREINS HYDRAULIQUES. — Le dispositif du *frein hydraulique*, qui équipe à peu près toutes les voitures automobiles, est représenté très schématiquement par la figure 14. En appuyant sur la pédale de freinage, on exerce, grâce à un levier, une force sur un piston **A** logé dans le *maître-cylindre*. Celui-ci contient un liquide spécial

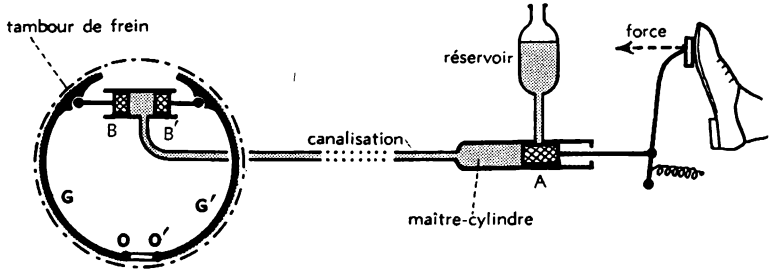


FIG. 14. — *Schéma d'une installation de frein hydraulique.*

incompressible, visqueux, et, par une *canalisation*, communique avec un *cylindre de roue* muni de deux pistons **B** et **B'**. Le liquide occupant entièrement les cylindres et la canalisation, une pression créée sur **A** se transmet intégralement aux faces de **B** et **B'** qui s'écartent l'une de l'autre en appliquant contre le *tambour de frein*, solidaire de la roue, deux *garnitures de friction* **G** et **G'** articulées en **O** et **O'**. Quand le pied n'agit plus sur la pédale, un système de ressort ramène le piston *A* en arrière et fait cesser le freinage. Aucune fuite de liquide ne peut, bien entendu, être tolérée le long des canalisations qui, par ailleurs, ne doivent pas contenir d'air. Un réservoir, plein de liquide, est en permanence relié au circuit pour assurer le remplissage. Lors d'un coup de frein, le passage du piston **A** devant l'orifice isole ce réservoir.

C. FORCES TRANSMISES AUX VASES

7. FORCES EXERCÉES SUR LE FOND HORIZONTAL DES VASES.

— Soit un vase *V*, de forme absolument quelconque, dont le fond *AB*, horizontal, a une surface égale à *S* (fig. 15). Soit ***p*** la pression due au liquide sur un point quelconque *M* du fond. Si ϖ est le poids volumique du liquide, ***h*** la distance verticale de *M* au plan de la surface libre, la pression ***p*** est :

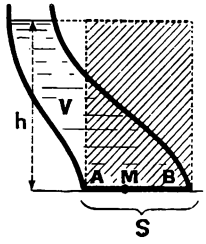


FIG. 15.

$$p = \varpi \times h$$

et la force qui en résulte sur le fond est :

$$F = p \times S = \varpi \times h \times S.$$

Mais $h \times S$ représente le *volume* d'un cylindre de base S et de hauteur *h*; $\varpi \times h \times S$ est le *poids* de ce cylindre rempli de liquide. Donc : ***la force exercée sur le fond horizontal d'un vase par le liquide qu'il contient est égale au poids d'une colonne verticale de liquide ayant pour base le fond du vase et pour hauteur la distance de ce fond à la surface libre du liquide.***

Vérification expérimentale.

Au-dessous du plateau d'une balance (fig. 16), disposons un cylindre vertical en verre *A* de diamètre intérieur *d*, dont la base est bien rodée. Pour en obturer le fond accrochons au plateau par l'intermédiaire d'un fil un disque en verre que nous équilibrons exactement en agissant sur le plateau opposé avec un poids $\vec{p}$ convenable.

Ajoutons sur le même plateau un poids $\vec{P}$; le disque est alors appliqué contre le cylindre. Emplissons lentement d'eau le cylindre *A*. Au moment précis où l'eau s'échappe par le fond, son poids est équilibré par le poids $\vec{P}$. Notons son *niveau* à l'aide d'un index.

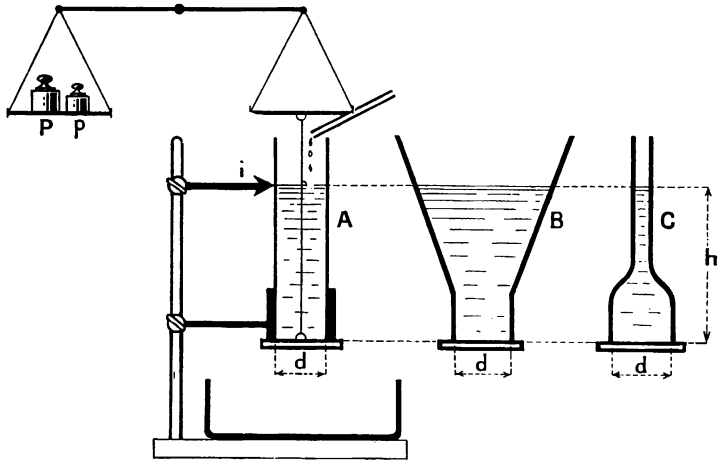


FIG. 16.

Remplaçons alors le cylindre par les vases *B* et *C* de même surface de base, et recommençons l'expérience sans changer les poids *P* et *p*. Nous constatons que le disque obturateur décolle lorsque l'eau atteint le *même niveau* ***h*** au-dessus du fond de chacun des vases. Nous vérifions ainsi que la force qui s'exerce sur le fond des vases *A*, *B*, *C* est représentée par le poids d'une colonne cylindrique de liquide de hauteur *h*.

Il faut noter ce résultat, *en apparence paradoxal*, que la force exercée sur le fond d'un vase peut être *plus grande* (vase *C*) ou *plus petite* (vase *B*) que le poids total du liquide qu'il contient.

8. FORCES EXERCÉES SUR LES PAROIS LATÉRALES. — Considérons la paroi latérale *AB* supposée plane d'un vase contenant un liquide en équilibre (fig. 17).

En chacun des points *MNOP*... la pression du liquide possède une valeur différente, plus grande pour les points les plus éloignés de la surface.

Chaque centimètre carré de surface entourant les points *MNOP* reçoit donc une force numériquement égale à la pression en ces points. Les forces $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3, \vec{f}_4$ forment un système de forces parallèles inégales et de même sens; elles admettent un *centre des forces parallèles* qui est le point d'application *C* de leur résultante $\vec{R}$.

En chaque point d'une face non plane A′ B′, on peut faire un raisonnement analogue, mais il n'est plus possible de se rendre directement compte de l'effet *total* des forces de pression car les forces élémentaires ne sont ni parallèles, ni concourantes...

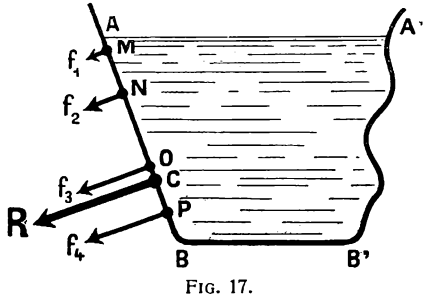


FIG. 17.

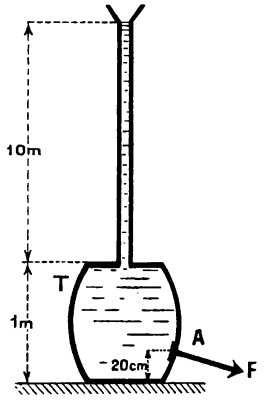


FIG. 18. — *Crève-tonneau.*

Les effets des forces exercées sur une portion de paroi ne dépendent donc pas de la quantité de liquide contenu dans le récipent, mais de la *profondeur des différents points qui composent cette surface.* Deux exemples feront comprendre cette particularité.

Crève-tonneau de Pascal. — Un solide tonneau T est surmonté d'un tube long et étroit (fig. 18). Le tonneau étant entièrement rempli d'eau, il suffit d'en verser *moins d'un litre* dans le tube vertical pour voir le tonneau fuir de toutes parts.

L'explication est simple. Prenons un exemple numérique appliqué à la figure 18.

Quand le tube vertical est *vide*, la pression due au liquide en A (à 20 cm du fond inférieur) est :

$$p = 80 \text{ gf/cm}^2$$

et la force qui s'exerce sur un décimètre carré de surface située autour du point A est :

$$f = 80 \times 100 = 8\,000 \text{ gf}$$
$$= 8 \text{ kgf.}$$

Le tonneau est construit pour résister facilement à un tel effort.

Par contre, quand le tube est *plein*, la distance du point A à la surface horizontale du liquide est 10,8 m; la pression due à l'eau en A est :

$$p' = 1\,080 \text{ gf/cm}^2$$

et la force précédente devient :

$$f' = 1\,080 \times 100 = 108\,000 \text{ gf}$$
$$= 108 \text{ kgf.}$$

Le tonneau ne résiste plus.

Exercice. — *Calculer les forces exercées sur le fond supérieur du tonneau (diamètre : 80 cm) dans les deux cas précédents. Les comparer.*

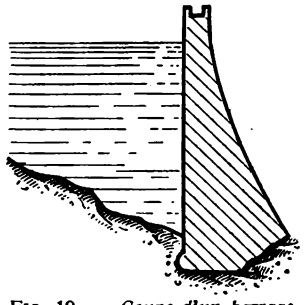


FIG. 19. — *Coupe d'un barrage*

Barrages. — Les digues et les barrages doivent résister sans se rompre à des forces de pression d'autant plus grandes que la profondeur de l'eau est plus grande. Les ingénieurs qui les construisent doivent en tenir compte pour déterminer leur profil. Le plus souvent, l'épaisseur à la base est beaucoup plus grande qu'au sommet (fig. 19).

9. RÉSULTANTE DE TOUTES LES FORCES PRESSANTES SUR UN RÉCIPIENT.

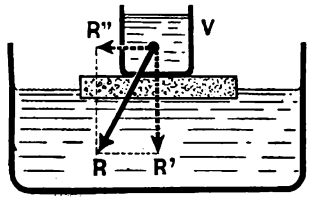


FIG. 20.

1. **La résultante est verticale.** — Soit un vase vide *V* placé sur un large flotteur (fig. 20). Versons lentement de l'eau dans le vase. Si la résultante $\vec{R}$ des forces pressantes était *oblique*, nous pourrions la décomposer en deux forces : $\vec{R'}$ verticale et $\vec{R''}$ horizontale. $\vec{R''}$ aurait pour effet de déplacer latéralement le flotteur, ce que nous n'observons pas. La résultante $\vec{R}$ est donc ***verticale.***

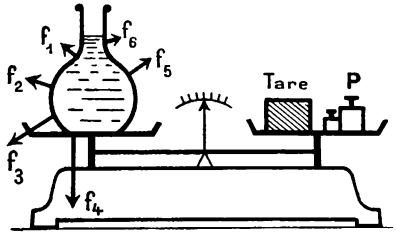


FIG. 21. — *La résultante de toutes les forces pressantes sur le vase est égale au poids du liquide.*

2. **Elle est égale au poids du liquide.** — Équilibrons avec une tare convenable un vase vide placé sur le plateau d'une balance. Versons dans le vase *un litre d'eau* (fig. 21). Chaque centimètre carré de surface (fond et parois) subit alors une force et toutes ces forces $\vec{f_1}, \vec{f_2}, \vec{f_3}$ forment un système complexe dont nous savons seulement que la résultante est *verticale*; or le fléau s'incline du côté du vase; la résultante est donc *orientée vers le bas.*

Rétablissons l'équilibre avec des masses marquées. Nous trouvons que leur poids est P = 1 kgf. L'intensité R de la force est donc égale au poids du liquide que contient le vase.

En résumé :

Les forces pressantes sur le fond horizontal ou sur les parois latérales d'un vase ne dépendent que de la hauteur du liquide au-dessus des points considérés.

La résultante de toutes les forces pressantes est représentée par le poids du liquide.

EXERCICES

(On ne tient pas compte de la pression atmosphérique.)

1. Dans une branche d'un tube en U on verse de l'eau pure; dans l'autre un liquide L non miscible à l'eau. Quand l'équilibre est établi, on mesure les hauteurs suivantes au-dessus du plan horizontal de la table :

Surface libre du liquide : $h_1 = 52{,}8$ cm.

Surface libre de l'eau : $h_2 = 48{,}7$ cm.

Surface de séparation : liquide — eau : $h_3 = 9{,}6$cm

Quel est le poids volumique du liquide? Avec quelle précision est-il connu si on admet que les trois hauteurs sont mesurées à 1 mm près?

Rép. : 0,90 gf/cm³ à 1/100 près.

2. Montrer qu'il y a conservation du travail dans la presse hydraulique (on remarquera que le volume d'eau chassé par un déplacement du petit piston apparaît sous le grand piston).

3. Un tube en U contient dans une de ses branches A du mercure; dans l'autre, B, de l'eau. La hauteur de la colonne d'eau est 30 cm. On verse dans A de l'alcool jusqu'à ce que les niveaux supérieurs de l'eau et de l'alcool soient dans le même plan horizontal. Quelle est la hauteur de la colonne d'alcool?

Poids volumique de l'alcool : 0,8 gf/cm³.
Rép. : 29,5 cm.

4. Les rayons des deux cylindres d'une presse hydraulique sont respectivement 10 cm et 2 cm. Sur le grand piston, on exerce une force de 250 kgf.
Quelle force doit-on exercer sur le petit piston pour maintenir l'équilibre? Rép. : 10 kgf.

5. Un seau tronc-conique a un fond de 300 cm². Quelle est la force exercée sur le fond quand la hauteur de l'eau est à 25 cm dans le seau?
Rép. : 7,5 kgf.

6. Les vannes d'un barrage hydroélectrique ont une surface de 1 m² et leur centre se trouve à 60 m au-dessous du niveau de l'eau.
Quelle est en kgf la force supportée par une vanne?
Rép. : 60 000 kgf.

7. Un tube en U contenant du mercure possède une branche A de diamètre 5 cm. Au-dessus du mercure de A est un piston très mobile et de poids 10 kgf. Quelle est, dans l'autre branche, la hauteur du mercure au-dessus du plan horizontal contenant la face inférieure du piston? Rép. : 37,4 cm.

PROBLÈMES

1. 1° Un tube de verre en *U* dont les branches sont longues, verticales, et ont une section intérieure de 1 cm² est ouvert aux deux extrémités et contient de l'eau. On verse d'un côté 5 cm³ d'huile qui surnage. On constate que la différence de niveau des deux surfaces libres liquides est 7,5 mm. Quels sont le poids volumique et la densité de l'huile?

2° On fait arriver du gaz d'éclairage au-dessus de l'huile par un tuyau de caoutchouc ajusté sur une des extrémités du tube. La surface *S* de séparation entre l'eau et l'huile se déplace dans la même branche verticale de 20 cm. Quelle est, en cm de mercure, l'excès de pression du gaz sur la pression atmosphérique?

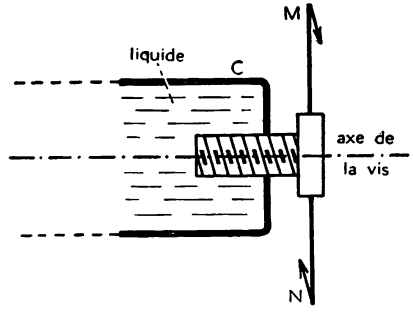
3° Les deux extrémités du tube en *U* ayant été un instant ouvertes, on branche le tuyau à gaz à la partie qui ne contient pas l'huile. De quelle longueur se déplace alors la surface de séparation entre l'eau et le gaz?

2. Le corps, indéformable, d'une presse hydraulique comprend un grand cylindre *A* et un petit cylindre *B* reliés par une canalisation. Les axes des cylindres sont verticaux et leurs diamètres sont, respectivement, pour $A : D = 20\ cm$; pour $B : d = 4\ cm$. Un liquide, de densité 0,8 monte initialement à la même hauteur dans les deux cylindres. On supposera toutes les fuites supprimées, tous les frottements négligeables, et on adoptera la valeur numérique : $\pi = 3{,}14$.

1° Sur le liquide de *A* on place un piston de poids $P = 40\ kgf$. Quelle est, après son immobilisation, la différence des niveaux des deux surfaces horizontales du liquide?

2° Quel poids devrait avoir un piston placé sur le liquide en *B* pour ramener les deux faces inférieures des pistons dans un même plan horizontal?

3° On remplace *B* par un cylindre horizontal *C* dont l'extrémité fermée est traversée par une vis d'axe horizontal (fig.) qu'on peut manœuvrer de l'extérieur à l'aide d'une tige *MN*. L'axe de la vis est à 40 cm au-dessous de la face inférieure du piston situé dans *A*. Le diamètre moyen de la vis est 2 cm; son *pas* (c'est-à-dire la longueur dont elle avance en tournant d'un tour) est 2 mm. Quel est le déplacement du grand piston quand la vis effectue 10 tours?



4° On place sur le grand piston un fardeau pesant 200 kgf. Quelle est la force qui tend à repousser la vis hors de l'appareil?

5° En admettant que la presse hydraulique et la vis sont deux machines simples qui « conservent le travail », calculer le moment du couple qui, appliqué à la tige *MN*, permet de soulever le fardeau.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 16. Manomètres comparés.

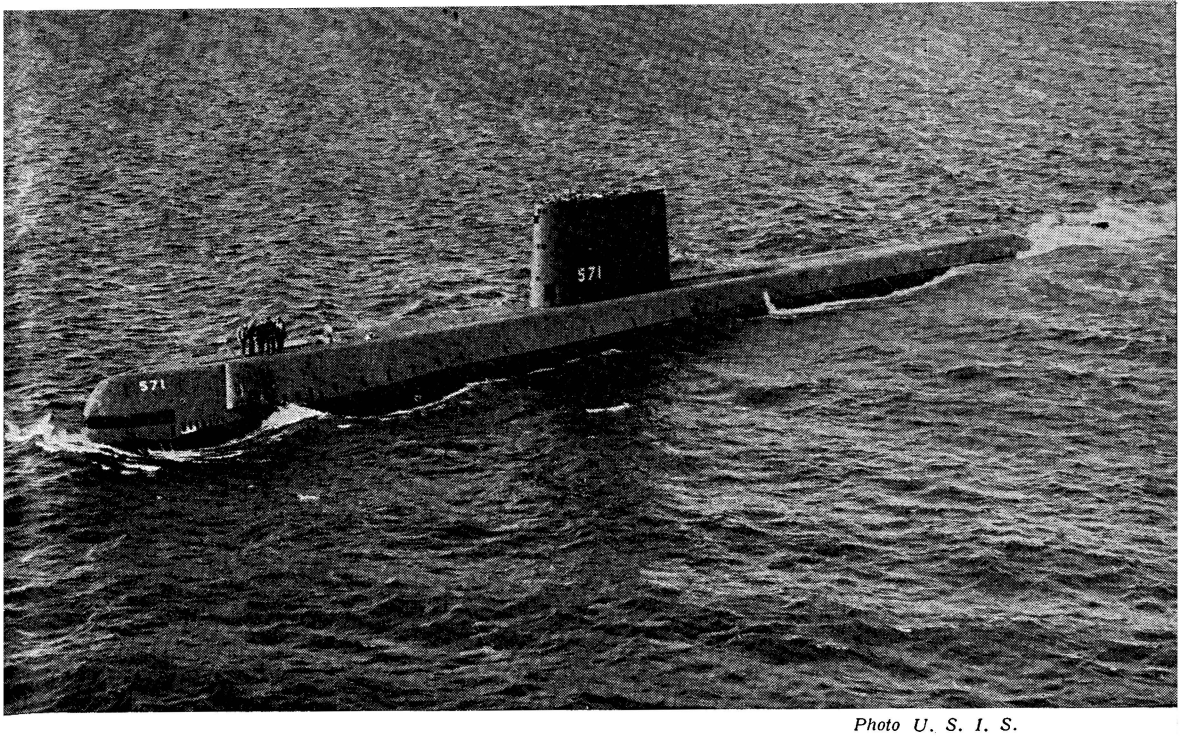


Photo U. S. I. S.

FIG. 1. — *Un sous-marin peut modifier son poids* (§ 12). *Il a donc la faculté de reposer au fond de la mer, de naviguer au sein de l'eau, ou de faire surface.*

14. APPLICATIONS DU PRINCIPE FONDAMENTAL

A. LOI (ou THÉORÈME) D'ARCHIMÈDE[1]

1. Maintenons un caillou dans l'eau; son poids paraît très nettement *diminué*. Un bouchon de liège abandonné au fond d'un bassin s'élève dans l'eau alors que son poids le sollicite vers le bas. Chaque jour nous apporte la preuve que les corps solides complètement ou partiellement immergés dans les liquides subissent de la part de ceux-ci des *forces*. On doit à Archimède d'avoir su établir de façon précise l'origine de ces forces, et d'avoir précisé les 4 éléments de leur résultante, dans le cas où les solides sont *complètement* plongés dans les liquides au *repos*.

2. EXPÉRIENCES.

1. Suspendons un objet solide à un dynamomètre et notons son poids P (fig. 2, *a*). Plongeons ensuite l'objet dans une éprouvette *graduée* contenant de l'eau et assurons-

(1) ARCHIMÈDE (V. notice biographique).

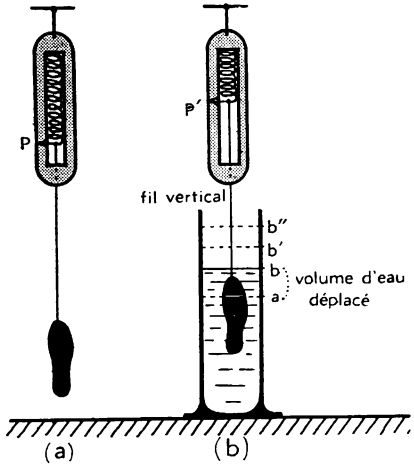


FIG. 2.

nous qu'il est complètement immergé; le dynamomètre indique une force plus faible, P′ : le solide semble peser moins dans l'eau que dans l'air; l'eau exerce sur lui une force ou *poussée* orientée vers le haut (fig. 2, *b*). L'intensité de cette force (P — P′) est d'ailleurs indépendante de la profondeur à laquelle se trouve immobilisé le solide, comme on le voit immédiatement en ajoutant de l'eau pour atteindre les niveau *b*, *b′ b″*.

2. Le fil de suspension reste vertical quand le solide est plongé dans l'eau; la poussée de l'eau est donc une *force verticale*. Sinon, en se composant avec le poids qui, lui, est vertical elle donnerait une résultante oblique qui amènerait le fil à prendre une direction oblique.

3. Avant d'introduire le solide dans l'eau, le niveau de l'eau était en *a*; quand l'immersion est totale, le niveau vient en *b*. La graduation de l'éprouvette donne le volume d'eau déplacé par le solide. Nous observons que la diminution apparente du poids du corps est précisément égale au poids de cette eau : La poussée de l'eau est donc égale en grandeur au *poids de l'eau déplacée*.

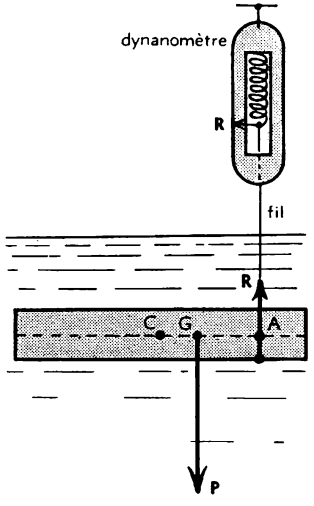


FIG. 3.

4. Choisissons un solide de forme géométrique simple, par exemple un cylindre obtenu en assemblant deux parties de densités différentes de sorte que son centre de gravité G, déterminé par l'expérience ou par le calcul, *ne coïncide pas* avec son centre de symétrie C (fig. 3). Soit P le poids de ce solide, V son volume, P et V étant choisis pour que, abandonné dans l'eau, le corps tombe naturellement au fond du récipient.

Essayons de le maintenir immergé, immobile, en une position telle que son axe soit horizontal; il faut, pour y parvenir, lui appliquer une force verticale $\vec{R}$, vers le haut, exercée par l'intermédiaire d'un fil à boucle coulissante dont la position est déterminée

après quelques essais. La boucle permet de définir avec une précision suffisante le point d'application A de $\vec{R}$; un dynamomètre en donne l'intensité [1].

Dans l'eau le solide est en équilibre sous l'action de 3 forces parallèles :

$\vec{P}$: son poids (vers le bas)

$\vec{R}$: traction du fil (vers le haut)

$\vec{F}$: poussée de l'eau (vers le haut).

En considérant $\vec{F}$ comme égale et opposée à la résultante de $\vec{P}$ et $\vec{R}$ nous pourrons chercher son point d'application H sur l'axe. Désignons par x la longueur GH. L'expérience nous donne la longueur $GA = a$. Par suite :

$$R(a + x) = P.x.$$

Le calcul de x montre que le point H coïncide avec le centre de symétrie du solide immergé; le point d'application de la force d'Archimède est donc *le centre de gravité de l'eau déplacée.*

3. LOI (ou THÉORÈME) D'ARCHIMÈDE. — Tous ces résultats se généralisent aux corps solides de formes et de natures quelconques, plongés entièrement dans des liquides quelconques. L'énoncé qui va suivre, autrefois connu sous le nom de *Principe d'Archimède,* peut être considéré comme établi avec précision par l'expérience; il doit alors être appelé *loi.* On peut aussi en donner une démonstration, qui fut suggérée par STEVIN [2]; il mérite alors d'être nommé *théorème.*

Théorème : *Tout corps solide complètement plongé dans un liquide en équilibre subit de la part de ce liquide un ensemble de forces pressantes dont la résultante est définie par les 4 éléments suivants :*

a) **direction : *verticale;***
b) **sens : *vers le haut;***
c) **intensité : *égale au poids du liquide déplacé:***
d) **point d'application : *centre de gravité du liquide déplacé*** (*appelé* : **centre de poussée.**)

4. DÉMONSTRATION DE STEVIN. — Soit un liquide en équilibre (fig. 4). *Isolons par la pensée* un certain volume de ce liquide, enfermé dans une enveloppe *fictive* E. Ce volume, parfaitement en équilibre, subit de la part du liquide extérieur à E des forces pressantes telles que $\vec{f}, \vec{f'}, \vec{f''}$, etc., dont la résultante $\vec{R}$ est égale et opposée à son poids $\vec{P}$.

---

(1) On vérifie que la force $\vec{R}$ a comme intensité la différence des intensités de $\vec{P}$ (poids du cylindre) et $\vec{F}$ (poussée numériquement égale à V puisque le cylindre est plongé dans l'eau).

(2) STEVIN (V. notice biographique).

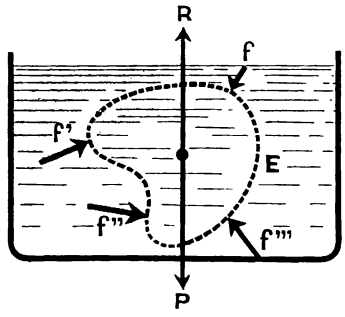


FIG. 4.

Supposons que le liquide inclus dans E se solidifie *sans changer de volume.* Son poids $\vec{P}$ et les forces $\vec{f}$, $\vec{f'}$, $\vec{f''}$ ne sont pas modifiés.

Ce *solide* immergé se trouve en équilibre sous l'action de deux forces égales et opposées :

a) son poids $\vec{P}$ (c'est aussi le poids du liquide déplacé);

b) la résultante $\vec{R}$ des forces de pression (c'est la poussée d'Archimède). La poussée d'Archimède est donc verticale, orientée vers le haut, égale au poids du liquide déplacé, et appliquée au centre de gravité du liquide déplacé.

5. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE. — L'expérience permet de vérifier certaines des conclusions précédentes avec une précision supérieure à celle que donne un dynamomètre.

Sous le plateau *D* d'une balance suspendons à un fil un solide *S*. Plaçons sur *D* un petit cristallisoir *C* et faisons la tare (fig. 5, *a*).

Plongeons entièrement le solide dans un *vase à déversement* plein d'eau (fig. 5, *b*); la balance s'incline du côté du plateau G, pendant que le solide *déplace* un certain volume d'eau qu'on recueille en *C'* : la poussée est donc dirigée vers le haut. Le fil restant vertical, la poussée est donc verticale.

Faisons passer l'eau recueillie de C' en C : l'équilibre est rétabli (fig. 5*c*); la poussée exercée sur le solide S est donc bien *égale au poids de l'eau déplacée.*

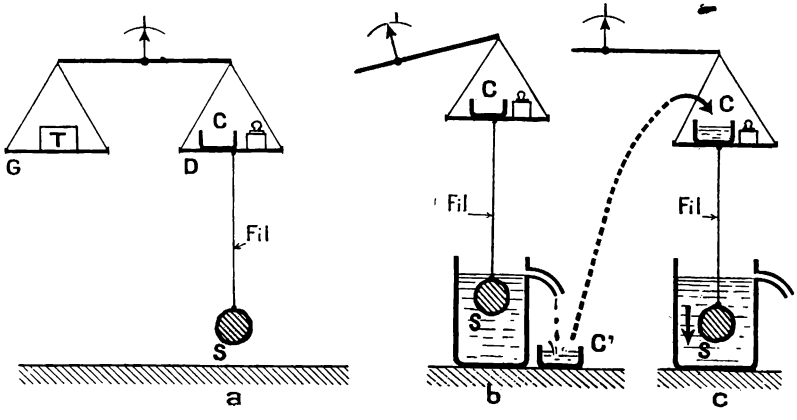


FIG. 5. — *Vérification expérimentale du Théorème d'Archimède.*

6. RÉCIPROQUE. — En vertu du *Principe d'Action et Réaction*, nous pouvons dire :

Tout corps solide entièrement plongé dans un liquide en équilibre exerce sur ce dernier une force, verticale, dirigée de haut en bas, égale au poids du liquide déplacé, et appliquée au centre de gravité du liquide déplacé.

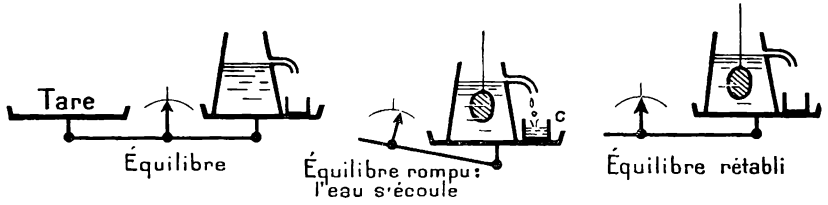


FIG. 6. — *Réciproque du théorème d'Archimède.*

La réciproque est facile à vérifier expérimentalement. Plaçons sur le plateau d'une balance (fig. 6) un vase à déversement exactement rempli d'eau et un cristallisoir. Faisons la tare. Immergeons dans le vase, *sans toucher les parois*, un corps quelconque retenu par un fil. L'équilibre est rompu au profit du vase pendant que le liquide s'écoule en *c*. Jetons l'eau de *c* et replaçons ce cristallisoir vide sur le plateau de la balance; l'équilibre est rétabli. L'action du solide sur le liquide qui l'entoure est donc bien *égale au poids du liquide déplacé.*

7. REMARQUES. — I. Le théorème d'Archimède ne s'applique que si le corps solide est *complètement immergé*, c'est-à-dire si tous les points de sa surface reçoivent des forces pressantes. Si cette condition n'est pas remplie, on risque de faire des erreurs de raisonnement. Ainsi sur un cas particulier :

Imaginons un disque vertical D, d'épaisseur uniforme, homogène, qui serait *à moitié immergé* comme l'indique la figure 7 et pourrait tourner librement autour d'un axe O. Soit G le centre de gravité du liquide déplacé. On pourrait penser qu'en G est appliquée verticalement vers le haut une force $\vec{F}$ égale au poids du volume de liquide déplacé; cette force $\vec{F}$, dont le moment par rapport à O n'est pas nul, entraînerait le disque et, continuellement renouvelée, transformerait ce disque en un véritable moteur, produisant le *mouvement* et le *travail perpétuels !* Il n'en est rien. Ce raisonnement est inexact. En se souvenant que les forces créées par les liquides sont *normales aux parois*, on voit que toutes les forces $\vec{f_1}, \vec{f_2}, \vec{f_3}$ sont dirigées suivant des *rayons* du disque, passent donc par O, et ont un *moment nul* par rapport à O. Le disque ne peut tourner.

II. **Centre de poussée :** il faut insister sur sa position : il s'agit du centre de gravité du *liquide* déplacé et non de celui du solide. Si le corps immergé est *homogène* et ne présente pas de cavité intérieure (bille de verre, bloc de plomb, etc.), ces deux points coïncident quelle que soit la forme du solide. Il n'en est pas de même si le solide homogène présente une *cavité intérieure* quelconque, ou avec un solide plein mais *non homogène.*

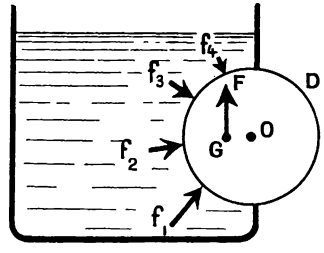


FIG. 7.

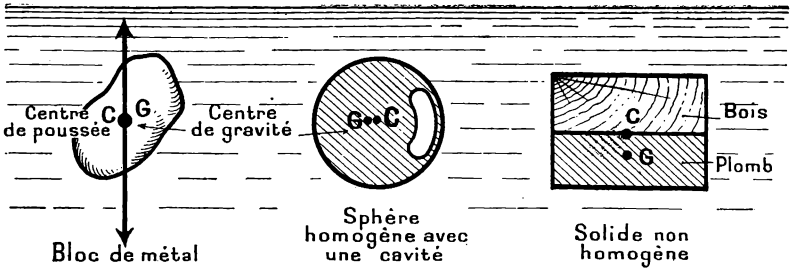


FIG. 8. — *Le centre de poussée ne coïncide pas toujours avec le centre de gravité.*

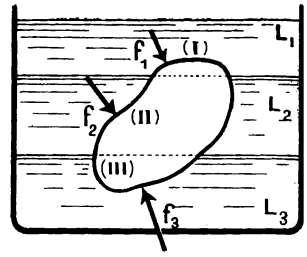


FIG. 9.

La figure 8 montre de façon évidente que le centre de poussée C et le centre de gravité G sont souvent distincts.

III. **Généralisation du théorème d'Archimède.** — Soit (fig. 9) un solide entièrement entouré de *plusieurs* liquides non miscibles superposés : L_1, L_2, L_3; chacun des liquides, qui est *en équilibre avec les liquides voisins*, exerce en tous les points de contact avec le solide des forces pressantes $\vec{f_1}$, $\vec{f_2}$, $\vec{f_3}$....

On admet que toutes ces forces ont comme résultante une force *verticale, dirigée vers le haut, égale à la somme des poids des portions (I) (II) (III) des liquides déplacés, et appliquée en un centre de poussée qui est le centre de gravité de l'ensemble des volumes (I) (II) (III) des liquides déplacés*, chacun des volumes intervenant avec son poids. On voit que ce centre de poussée dépend de la position du corps par rapport aux trois liquides.

Le théorème se généralise même au cas où le liquide supérieur est remplacé par un **gaz.** Liquides et gaz sont des fluides, qui, au moins dans le cas qui nous occupe, possèdent les mêmes propriétés. On peut considérer que le solide est plongé dans un *fluide hétérogène.*

8. APPLICATION : DÉTERMINATION DES POIDS VOLUMIQUES.

1. **Position du problème.** — D'après la définition du poids volumique $\varpi = \frac{P}{V}$, sa mesure comporte deux opérations :

a) Détermination du poids P d'un certain corps.

b) Détermination du volume V de ce corps.

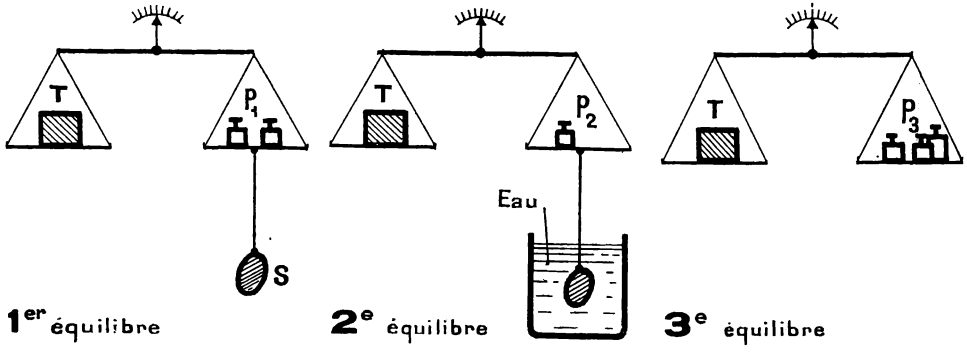


FIG. 10. — *Poids volumique d'un solide. Application du Théorème d'Archimède.*

1° Pratiquement, la pesée P ne présente aucune difficulté.

2° Par contre, la détermination directe de V étant peu précise, on ramènera toujours la mesure de V à celle du *poids* P′ *d'eau qui occupe ce volume.* Comme nous avons vu que le poids volumique de l'eau était, à la température ordinaire, très voisin de 1 gf/cm³ (0,999973 à + 4°), nous prendrons toujours le volume V numériquement égal au poids P′ [1]. L'application du théorème d'Archimède permet d'obtenir P′.

2. **Poids volumique des solides.** — Le solide S étant accroché par un fil *très fin* sous le plateau d'une balance, réalisons les équilibres suivants résumés par la figure 10 :

1er équilibre : Tare ⟷ Solide + p_1,

2e équilibre : Tare ⟷ Solide immergé (dans l'eau) + p_2,

3e équilibre : Tare ⟷ p_3,

On en déduit par double pesée $P = p_3 - p_1$

$$V = P' = p_2 - p_1$$

d'où $$\varpi = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_1}.$$

3. **Poids volumique des liquides.** — Suspendons un solide S, non soluble et non attaqué dans le liquide L, de volume *quelconque*, mais *invariable*, sous le plateau d'une balance et réalisons les équilibres suivants (fig. 11) :

1er équilibre : Tare ⟷ Solide + p_1.

2e équilibre : Tare ⟷ solide immergé (dans le liquide L) + p_2

3e équilibre : Tare ⟷ solide immergé (dans l'eau + p_3.

Par double pesée, nous obtenons le poids du liquide L déplacé : $P = p_2 - p_1$

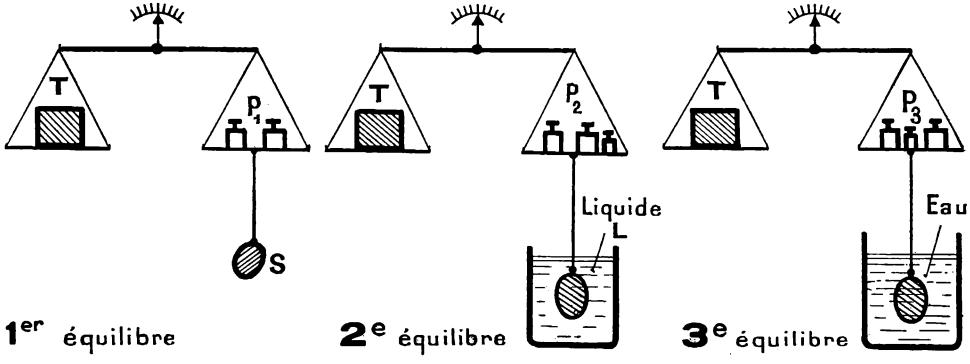


FIG. 11. — *Poids volumique d'un liquide. Application du Théorème d'Archimède.*

(1) Seules les mesures de grande précision exigeront la connaissance rigoureuse du poids volumique de l'eau pour calculer V, à partir de P′.

Volume du liquide L déplacé :

$$V = P' = p_3 - p_1$$

d'où :

$$\varpi = \frac{p_2 - p_1}{p_3 - p_1}.$$

9. MESURES DE HAUTE PRÉCISION : DÉTERMINATION DU POIDS VOLUMIQUE DE L'EAU PURE. — Dans les leçons précédentes, il a été question du poids volumique de l'eau; nous avons alors

soit admis qu'il était égal à 1 gf/cm³;

soit indiqué qu'il pouvait être déterminé avec une très grande précision.

L'eau pure étant le corps *de référence* pour la mesure des poids volumiques et des densités des liquides et des solides, on conçoit que la détermination précise de son poids volumique présente une importance primordiale. Elle devra se faire :

1° par une *mesure absolue*, et non par une méthode de comparaison ;

2° à une *température bien déterminée*, car à la précision qu'on désire obtenir la température a une influence non négligeable.

On a utilisé pour cela un *cube de quartz*, parfaitement taillé, dont l'arête était mesurée avec une extrême précision et on a réalisé, à l'aide d'une balance très sensible, les équilibres suivants (fig. 12) :

1er équilibre : Tare $\longleftrightarrow$ cube + p_1.

2e équilibre : Tare $\longleftrightarrow$ cube immergé (dans l'eau pure à $t°$) + p_2.

On a alors, par double pesée, le poids P de l'eau déplacée :

$$P = p_2 - p_1.$$

Si la mesure de l'arête du cube est l cm, son volume est [1] :

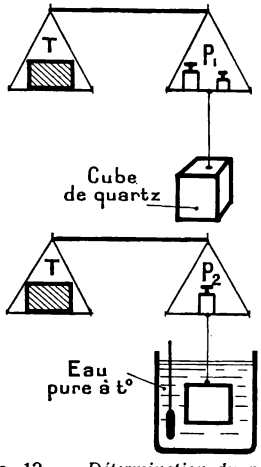


FIG. 12. — *Détermination du poids volumique de l'eau pure.*

$$V = l^3.$$

C'est aussi le *volume d'eau qu'il déplace*; donc :

$$\underset{\text{(eau à } t°)}{\varpi} = \frac{p_2 - p_1}{l^3}.$$

La méthode, qui fait intervenir uniquement des *mesures de longueurs* et des *pesées*, est **très précise;** elle a permis de déterminer le poids volumique de l'eau à 0° :

$$\varpi_0 = 0{,}99984 \text{ g/cm}^3.$$

(1) A toute température, le quartz conserve pratiquement le même volume, son *coefficient de dilatation* étant extrêmement faible (voir leçon : DILATATIONS).

B. CORPS FLOTTANTS

10. DÉFINITION. — Nous désignerons sous le nom général de ***corps flottants*** des solides qui, plongés *entièrement* ou *partiellement* dans des liquides, reçoivent de la part de ceux-ci des forces provoquant un allègement apparent. Exemples : bateaux, scaphandriers, sous-marins...

Demandons-nous ce que devient un solide, que nous supposerons pour plus de généralité *non homogène*, abandonné au sein d'un liquide. Trois cas peuvent se présenter.

11. PREMIER CAS. — Poids du solide supérieur au poids du liquide déplacé (P > F) (fig. 13). — Le poids P, appliqué au centre de gravité G du solide, est supérieur à la force d'Archimède F, appliquée en C, centre de poussée. Sous l'effet de ces deux forces, le solide *tombe au fond* du récipient sur lequel il s'appuie finalement en adoptant une position d'équilibre telle *que* G *soit le plus bas possible*, les deux forces $\vec{P}$ et $\vec{F}$ ayant même support vertical. Au point K, le solide appuie donc sur le fond avec une force P — F; la réaction du fond du bassin a comme intensité R = P— F.

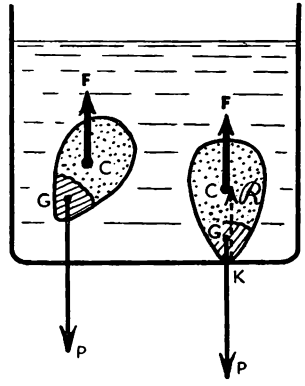


FIG. 13. — P > F.

Ce cas se présente très fréquemment : c'est le cas des *cailloux* reposant au fond des eaux, c'est aussi le cas des *scaphandriers* : le scaphandre, vêtement imperméable souple, semi-rigide, ou rigide, est toujours muni de chaussures à lourdes semelles de plomb de façon à assurer la position verticale de l'ouvrier au fond de l'eau.

12. DEUXIÈME CAS. — Poids du solide égal au poids du liquide déplacé (P = F). — Les deux forces P et F forment alors un couple (fig. 14); le solide *pivote*, passe de la position **a** dans la position **b**. Il reste alors en *équilibre stable* au sein du liquide.

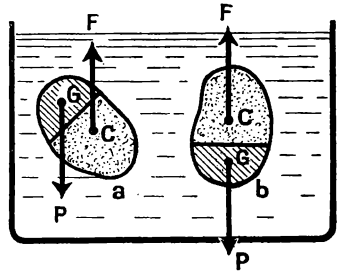


FIG. 14. — P = F.

L'égalité P = F se présente *très rarement de façon rigoureuse*; c'est un cas exceptionnel. Si une des forces est modifiée, même très peu, l'équilibre précédent est rompu et le corps immergé se met en mouvement, lentement,

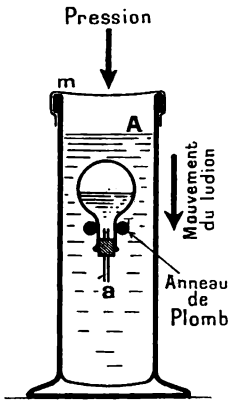


FIG. 15. — *Ludion.*

vers le haut si $F > P$, vers le bas si $F < P$, sous l'effet d'une force d'intensité :

$$\varphi = |P - F|.$$

Quelques exemples vont nous le montrer de façon plus précise; c'est le cas du jouet appelé ludion, des poissons, des sous-marins.

a) **Ludion.** — On peut construire un *ludion* avec un petit ballon de verre présentant un petit orifice, partiellement rempli d'eau et dont le centre de gravité se trouve déplacé vers le bas à l'aide d'un anneau de plomb (fig. 15).

Plaçons l'appareil dans une éprouvette pleine d'eau fermée par une membrane de caoutchouc *m*. Exerçons une pression sur la membrane; l'air comprimé en A transmet sa pression à l'eau qui pénètre dans le ballonnet en comprimant à son tour l'air contenu à la partie supérieure de celui-ci; le ludion, alourdi, et dont le volume est constant, descend. Si l'on cesse d'appuyer sur la membrane, il remonte, l'air comprimé dans le ballon chassant l'excès d'eau.

b) **Poissons.** — Un poisson conserve toujours le même poids, mais en comprimant ou dilatant plus ou moins sa *vessie natatoire* à l'aide de muscles spéciaux, il modifie son volume, donc la force d'Archimède qu'il subit, ce qui lui permet d'évoluer à différentes profondeurs.

c) **Sous-marins.** — Théoriquement le volume d'un sous-marin, dont la coque est rigide, est invariable (fig. 16).

Naviguant ordinairement en surface, il possède des compartiments latéraux le long et de chaque côté de la coque.

Pour plonger on laisse entrer de l'eau dans ces réservoirs (d'où leur nom de *water-ballast*). Le navire s'alourdit et s'enfonce. Pour remonter à la surface, on envoie de l'air

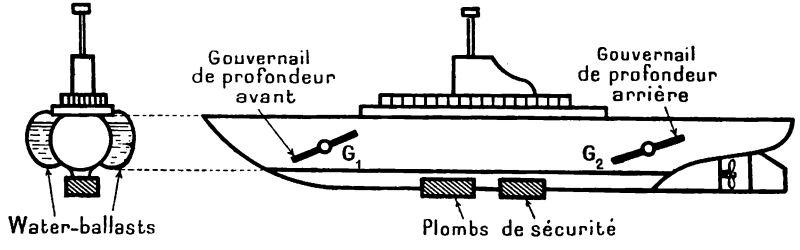


FIG. 16. – *Coupe d'un sous-marin.*

comprimé à l'aide de pompes à la partie supérieure des water-ballasts; l'air chasse l'eau, le poids P diminue et le sous-marin remonte.

Il semble donc que pour un réglage convenable de la quantité d'eau embarquée dans les réservoirs auxiliaires on puisse se maintenir à une profondeur donnée en équilibre *entre deux eaux*.

Il n'en est rien à cause des pressions supportées par la coque du bâtiment, qui dépendent de la profondeur, et qui déforment très légèrement les tôles en modifiant le volume total déplacé.

Soit un sous-marin établi à la profondeur h (fig. 17). Supposons qu'une très petite diminution de volume se produise; il commence alors à s'enfoncer très lentement; mais, passant à la profondeur $h' > h$, il subit des pressions plus élevées; sa coque se déforme davantage, le volume diminue encore; il descend plus vite en h'', ... etc.

Un raisonnement analogue peut se faire si, initialement, le volume vient à augmenter d'une très petite valeur; le mouvement amorcé vers le haut se continue de plus en plus rapidement.

En résumé, il est impossible à un sous-marin de se maintenir *immobile* à une profondeur donnée. Il parvient à conserver sa profondeur, en marche, par le jeu de *deux gouvernails de profondeur* G_1 et G_2 (fig. 16), sorte d'*ailerons* orientables qui reçoivent, pendant le mouvement du navire, des forces dues à la résistance de l'eau. Des *plombs de sécurité*, fixés sous la coque, peuvent être détachés, en cas d'accident aux pompes, pour alléger immédiatement le bateau et lui permettre de faire surface.

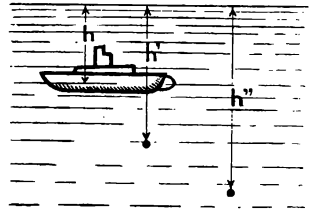


FIG. 17.

13. TROISIÈME CAS — Poids du solide inférieur au poids du liquide déplacé (P < F). — Dans le cas représenté par la figure 18, *après avoir pivoté* dans le liquide sous l'effet des deux forces parallèles inégales F et P (*a*) le solide *s'élève* dans le liquide sous l'influence de la force F — P (*b*) et atteint la surface (*c*).

A partir de cet instant, *il émerge;* P reste constant, mais F *diminue* pendant que le centre de poussée change constamment de place.

Finalement, l'équilibre s'établit quand la force de poussée est devenue égale au poids du solide.

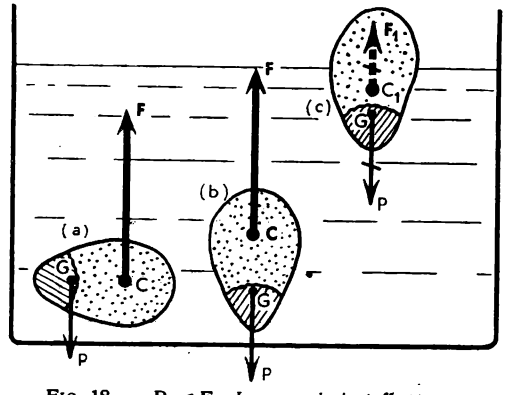


FIG. 18. — P < F : *Le corps devient* ***flottant.***

Remarque. — Ce raisonnement n'est pas en contradiction avec les conditions d'application du théorème d'Archimède (§ 7, Rem. I : Corps complètement immergé). La généralisation du théorème (§ 7, Rem. III) nous permet de l'appliquer quand un solide est entouré de plusieurs liquides, et même d'un gaz comme l'air.

En toute rigueur, dans l'équilibre, il faudrait donc tenir compte de la poussée d'Archimède due à *l'air déplacé*. Comme, à volume égal, l'air pèse environ 800 fois moins que l'eau, nous pourrons négliger cette force dans la plupart des cas. La condition de flottaison est donc :

***Quand un corps flotte sur un liquide au repos, son poids P est égal au poids F_1 du liquide déplacé par la* partie immergée.**

L'équilibre d'un corps partiellement immergé est assez compliqué du fait que, si l'on a toujours $P = F_1$, le centre de poussée *se déplace* quand le solide change de position par rapport à la surface du liquide.

1. Une **poutre** peut flotter dans la position (I) (fig. 19). Si pour une raison quelconque, elle prend une inclinaison, G reste fixe, mais C se déplace et, dans le cas de la figure 19 (II), un *couple de redressement* ramène la poutre à sa position initiale.

Par contre, si à partir de la position initiale (III), une légère inclinaison se manifeste, le couple P, F_1 est un *couple de renversement* (IV), la poutre *bascule* pour venir se placer finalement dans la position (I), seule *stable*.

2. Les **bateaux** sont soumis à des forces de ce genre, au moins tant qu'une trop grande inclinaison n'embarque pas d'eau à bord.

Sur un petit voilier, *à fond plat*, susceptible de prendre sous l'action du vent de fortes inclinaisons, le déplacement d'un *lest mobile* (masse des passagers) permet de modifier la position du centre de gravité.

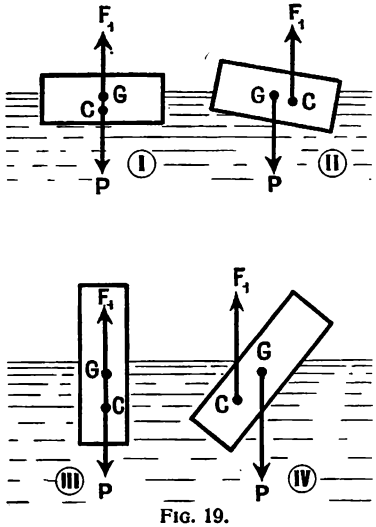


FIG. 19.

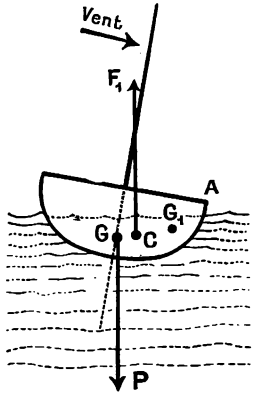


FIG. 20. — *Sur un voilier léger à fond plat, le déplacement des passagers peut créer un couple de renversement.*

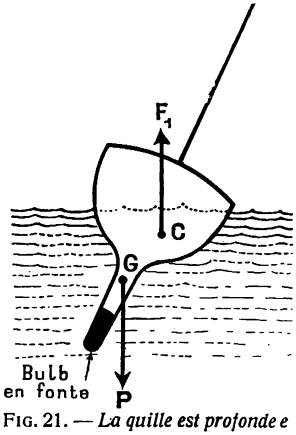


FIG. 21. — *La quille est profonde et fortement lestée. Le centre de gravité reste ainsi toujours au-dessous du centre de poussée. Le bateau est à peu près inchavirable.*

Ce serait une grave faute de se placer par exemple en A (fig. 20); le centre de gravité pourrait passer de G en G_1 créant un couple de renversement.

Sur les *voiliers à quille* (fig. 21), un *lest fixe* lourd, en fonte, est fixé à la partie la plus basse; c'est le *bulb* des bateaux de régates. Le centre de gravité est ainsi amené par construction en G au-dessous de la carène, c'est-à-dire au-dessous du centre de poussée.

De tels bateaux peuvent prendre des inclinaisons impressionnantes sans danger; ils sont pratiquement inchavirables.

L'art de l'architecte naval consiste, en établissant les plans d'une coque, à allier la finesse des formes, le confort des passagers et la sécurité.

3. **Densimètres.** — Les *densimètres* ou *aréomètres* sont des flotteurs de forme particulière destinés à mesurer rapidement les poids volumiques ou les densités des liquides.

Description : équilibre. — Construits en verre, ils comportent (fig. 22) :

a) une *ampoule* **A** de capacité comprise entre 10 et 50 cm^3 environ;

b) une *boule* **B** dans laquelle on a introduit comme lest de la grenaille de plomb ou une grosse goutte de mercure;

c) une *tige cylindrique* **T**, graduée, généralement fine.

A cause du lest, le centre de gravité **G** est toujours plus bas que le centre de poussée **C**; l'appareil flotte donc en équilibre stable, et, comme son poids est constant, ***il s'enfonce d'autant plus que le liquide est moins dense***, le niveau d'affleurement α étant fonction du **poids volumique** du liquide. On peut donc graduer expérimentalement l'appareil en le plongeant dans différents liquides de poids volumiques connus.

Pour des densités correspondant par exemple à la suite régulière 0,8, 0,9, 1, 1,1, 1,2, ... etc., on constate et le calcul confirme que ***les traits ne sont pas équidistants sur la tige graduée*** (fig. 23 à droite).

Différents types de densimètres. — Le nom de densimètre s'applique indistinctement à tous les appareils du type précédent. Suivant les usages auxquels ils sont destinés, on construit :

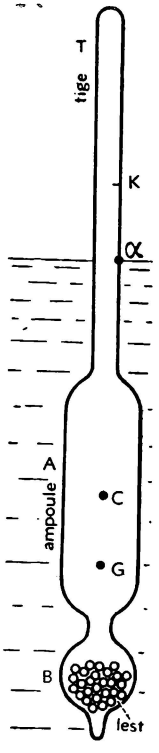


FIG. 22.

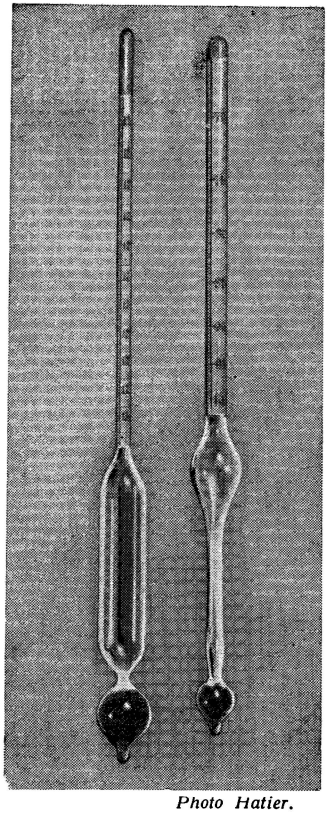


Photo Hatier.

FIG. 23. — *Deux aréomètres. L'un porte des divisions équidistantes (graduation Baumé). L'autre porte des traits non équidistants (graduation des densimètres modernes).*

a) des *alcoomètres*, qui donnent directement la richesse alcoolique des vins et liqueurs. Le poids volumique étant fonction de la concentration d'un mélange alcool-eau on peut expérimentalement graduer l'appareil en *degrés alcooliques* (alcoomètre de Gay-Lussac).

b) des *pèse-acides*, destinés à l'étude des mélanges eau-acide, toujours plus denses que l'eau;

c) des *pèse-esprits*, *pèse-sels*, *pèse-éthers*, *pèse-laits*, etc...

Les indications de ces appareils ne sont valables que pour *une certaine température*; nous verrons en effet (Leçon sur les *Dilatations*) que les poids volumiques des liquides dépendent de la température. Des *Tables numériques* permettent dans chaque cas particulier d'effectuer les corrections nécessaires.

Remarque : *degré Baumé*. — Les anciens pèse-acides étaient gradués plus simplement. Plongés dans l'eau pure ils enfonçaient jusqu'à un trait numéroté arbitrairement : zéro (0). Dans une solution d'eau salée à 15 g de sel marin pour 85 g d'eau, on notait un niveau d'affleurement numéroté arbitrairement : quinze (15). L'intervalle était divisé en 15 parties d'égale longueur et la graduation était prolongée au-dessous de 15; chacun des intervalles ainsi obtenus portait le nom de ***degré Baumé*** (fig. 23). A tout poids volumique correspond donc un nombre de degrés Baumé. Exemple : l'acide sulfurique à 66 degrés Baumé (66° B) a une densité de 1,84.

Ces appareils encore utilisés aujourd'hui tendent à disparaître, les industriels adoptant peu à peu l'usage d'indiquer la concentration des solutions par leur densité.

EXERCICES

1. Décrire et dessiner un montage expérimental simple permettant de vérifier *à la fois* le théorème d'Archimède et sa réciproque.

2. La poussée d'Archimède dépend-elle de la profondeur à laquelle le solide est immergé?

3. Un chaland est assimilable à un parallélépipède de 20 m de long et 3 m de large. Chargé, l'eau arrive à 50 cm du pont; vide, l'eau arrive à 1,10 m. Quel est le poids de la cargaison?

Rép. : 36 000 kgf.

4. Une pierre au fond de l'eau peut être soulevée avec une force de 3 kgf. Sa densité étant 1,80, quel poids a-t-elle hors de l'eau? Rép. : 6,75 kgf.

5. Une sphère creuse de poids 1 gf, de volume extérieur 6 cm^3, dont la paroi a une épaisseur négligeable, partiellement remplie d'eau et contenant 1 dg d'air, flotte au sein de l'eau où elle est en équilibre. Quel est le volume occupé par l'air?

Rép. : 1,1 cm^3.

6. Une boule métallique creuse, en métal de densité 7,5, flotte sur l'eau, son centre étant au niveau de la surface libre du liquide. Elle contient une cavité vide d'air et de capacité 1 dm^3. Quel est le poids de la boule? Rép. : 536 gf.

7. Une mine sous-marine est constituée par un récipient clos, de forme à peu près sphérique, de volume extérieur 100 dm^3, pesant 50 kgf, attaché par un cable C à un bloc de fonte M pesant 156 kgf et reposant sur le fond de la mer par une surface de 1 000 cm^2 (fig. 24).

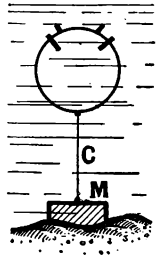


FIG. 24.

1° Quelle position prend-il dans l'eau supposée calme?

2° Avec quelle force tire-t-il sur le câble?

3° Sous l'influence de quelle force la sphère remorterait-elle à la surface en cas de rupture du câble?

4° Quelle est la pression exercée par M sur le fond de la mer?

Densité de l'eau de mer : 1,03; densité de la fonte : 7,8. Rép. : 53 kgf; 53 kgf; 82,4 gf/cm^2.

8. Une sphère de cuivre, de densité 8,9 et de volume 10 cm^3 est plongée dans un cristallisoir contenant du mercure surmonté d'eau. Quand elle est en équilibre, elle plonge en partie dans l'eau, en partie dans le mercure.

Que est le volume plongé dans le mercure et le volume plongé dans l'eau?

Rép. : dans l'eau : 3,73 cm³; dans le mercure : 6,27 cm³.

9. Un cube de fer d'arête 10 cm, de densité 7,8, flotte sur le mercure. Quelle est la hauteur de la partie immergée? Rép. : 5,7 cm.

10. Un morceau de glace de 50 cm³ flotte sur l'eau d'une éprouvette : le volume de la partie qui émerge est 5 cm³. Quelle est la densité de la glace? La glace fond. Que devient le niveau de l'eau dans l'éprouvette?

Rép. : 0,9; le niveau ne varie pas.

11. Un aréomètre étant plongé successivement dans l'eau pure et dans l'alcool (densité : 0,80), ces deux liquides affleurent respectivement aux divisions 0 et 100 de la tige. Sachant que la tige cylindrique, graduée en millimètres, a une section de 20 mm², on demande :

1° le poids de l'appareil;

2° à quelle division affleurera l'éther (densité : 0,72). Rép. : 8 gf; 155.

12. Un aréomètre particulier (fig. 25) est formé d'un réservoir clos en verre V de volume 50 cm³ relié à un socle S par un ressort R qui s'allonge de 2 cm pour une traction de 2 gf.

Quelle est la plus petite variation de densité d'un liquide qu'on peut déceler en immergeant complètement l'appareil si on admet qu'on peut apprécier un allongement de 1 mm du ressort.

Faire l'étude critique des qualités et défauts de l'appareil.

Comment pourrait-on accroître la sensibilité?

Dans certains cas, on a pu avec cet appareil déceler des variations de densité de l'eau de mer égales à 10^{-5} de la valeur admise (1, 025). Quel volume minimum faut-il donner à l'ampoule V?

Rép. : $\frac{2}{1\,000}$; $V > 9\,757$ cm³.

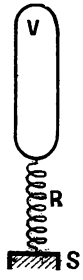


FIG. 25.

PROBLÈMES

1. Un aréomètre possède une tige cylindrique de longueur 200 mm et de section 20 mm² soudée à une ampoule de volume V. Dans l'eau pure l'affleurement a lieu au niveau de la soudure; dans un liquide L de densité 0,9 il a lieu à 2 cm du sommet de la tige.

1° Calculer le volume de l'ampoule.

2° L'appareil introduit verticalement dans un liquide L' de densité 0,8 peut-il émerger?

3° Avec quelle force appuie-t-il, en position verticale, sur le fond d'une éprouvette assez profonde remplie de liquide L'?

4° On introduit l'appareil dans une solution obtenue en mélangeant les deux liquides L et L'. L'affleurement se produit à 1 cm du sommet de la tige. Quelle est la composition de la solution? (On indiquera le nombre de centimètres cubes de L utilisés pour faire 100 cm³ du mélange; on admettra que le mélange se fait sans variation du volume de chacun des constituants.)

2. Un cylindre métallique, homogène, a comme dimensions : hauteur : $h = 10$ *cm, à 1/10 mm près*; diamètre : $D = 1$ *cm à 1/100 mm près*. Le cylindre étant suspendu sous le plateau d'une balance très fidèle et une tare invariable placée sur l'autre plateau, on réalise les équilibres suivants :

[1]. Tare équilibre : cylindre + fil de suspension + 231,360 g à 1 mg près.

[2]. Tare équilibre : cylindre immergé dans un liquide + fil + 238,641 g à 1 mg près.

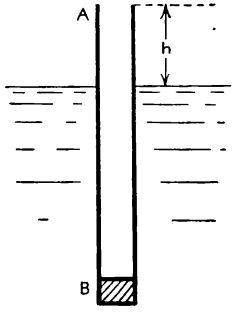
[3]. Tare équilibre : fil de suspension + 299,873 g à 1 mg près.

Calculer les masses volumiques ρ (métal) et ρ' (liquide) ainsi que les densités d et d'. Choisir la valeur numérique de π à adopter en tenant compte des incertitudes sur les pesées. Donner les quatre résultats en tenant compte des erreurs dans les mesures.

3. Un tube cylindrique AB, de longueur 20 cm, pesant 20 gf, est fermé en B par une pastille métallique d'épaisseur 1 cm, pesant 20 gf. Quand il flotte librement dans l'eau pure le niveau de l'eau affleure exactement en A. Quand il flotte dans un liquide de densité $d = 1{,}08$, une hauteur h émerge.

1° Calculer h.

2° Quelles sont les pressions exercées sur le fond du tube flottant dans l'eau? dans le liquide?



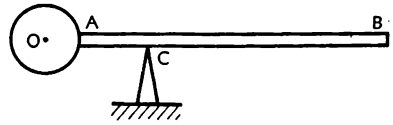
3° Comment varie h en fonction de d? Tracer le graphique représentatif (h en ordonnées). Donner à d quelques valeurs numériques pour construire la courbe avec précision. Déterminer graphiquement la densité d'un liquide pour lequel $h = 2{,}75$ *cm*.

4° L'emploi de ce tube, comme densimètre, n'est-il pas limité par sa forme et sa construction? Préciser les limites pratiques du graphique précédent.

5° Pour quels liquides offrira-t-il *la plus mauvaise* sensibilité? Quelle variation de hauteur h faudrait-il, dans ce cas, pouvoir mesurer si on voulait atteindre la deuxième décimale?

4. Une canne est constituée par l'assemblage d'une tige AB cylindrique, homogène, de section 2 cm², de poids 100 gf, de longueur 76 cm et d'une sphère, de centre O, de rayon 2 cm, homogène, de masse 220 g. Le centre de la sphère est situé dans le prolongement de l'axe de la tige.

1° La canne repose, en équilibre, en position horizontale (v. fig.) sur l'arête horizontale d'un couteau C. Déterminer la posi-



tion du couteau en calculant la distance de C au plan vertical passant par O. Nature de cet équilibre?

2° La canne est complètement immergée dans l'eau d'un bassin. La sphère repose sur le fond horizontal du récipient et AB est vertical.

Quelle est la nature de l'équilibre?

Quelle est la réaction opposée par le fond du bassin?

3° La canne étant dans la position définie dans la deuxième question, on vide lentement l'eau du bassin. Quelle hauteur d'eau reste-t-il quand la canne bascule?

Prendre : $\pi = 3{,}14$. Volume d'une sphère de rayon R : $\frac{4}{3}\pi R^3$.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 17. Densités des solides (application du théorème d'Archimède).

N° 18. Corps flottants (aréomètres).

Photo France Reportage.

FIG. 1. — *Départ d'une épreuve sportive pour ballons sphériques.*

15. AÉROSTATIQUE (STATIQUE DES GAZ)

1. CARACTÈRES PARTICULIERS DE LA STATIQUE DES GAZ. — Comme les liquides, les gaz sont des *fluides*, c'est-à-dire qu'ils sont déformables. Comme les liquides, les gaz sont des fluides *pesants*. Comme les liquides, les gaz, formés de molécules en état d'agitation perpétuelle et désordonnée, fournissent des *forces pressantes normales aux parois* solides qui se trouvent à leur contact.

La Statique des gaz aura donc de nombreux points communs avec l'Hydrostatique; en particulier ***le principe fondamental est applicable aux gaz sans changement ;*** mais il faudra toujours tenir compte de certaines particularités propres à l'état gazeux :

a) Les gaz sont *expansibles*; ils occupent tout le volume offert.

b) Les gaz sont, à volume égal, *beaucoup plus légers que les liquides.*

c) Les gaz sont *très compressibles*; soumis à une même variation de pression, leur volume diminue beaucoup plus que le même volume d'un liquide.

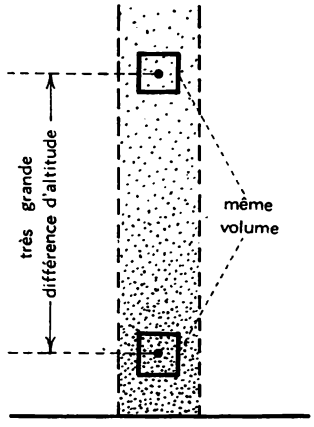


FIG. 2. — *Répartition des molécules d'un gaz suivant l'altitude.*

Comprimer un gaz c'est diminuer la distance moyenne entre ses molécules, c'est-à-dire les rassembler dans un volume plus faible. Mais la compressibilité des gaz présente une conséquence très importante. Si, par une sorte de photographie instantanée, on pouvait fixer les positions des innombrables molécules qui occupent une colonne gazeuse de très grande hauteur, on obtiendrait l'aspect de la figure 2. Des volumes égaux, pris à des altitudes différentes ne contiennent pas le même nombre de molécules; *la répartition n'est donc pas uniforme.* On peut concevoir cette distribution comme le résultat de deux causes contraires qui se superposent : l'agitation désordonnée qui tend à conserver aux molécules une très grande dispersion et la pesanteur qui tend à les grouper vers le bas. D'une façon imagée mais suffisamment exacte on peut dire que les molécules de la partie inférieure sont suffisamment comprimées par celles qui se trouvent au-dessus d'elles pour se rapprocher notablement, alors que dans les liquides, où les molécules sont déjà très voisines, un tel rapprochement est impossible ou reste inappréciable. En raison de cette répartition qui varie avec les niveaux, un même gaz ne présente pas la même masse volumique en tous les points d'une colonne de grande hauteur; on ne peut donc, en toute rigueur, parler que d'une *masse volumique moyenne.* Toutefois nous allons voir que cette différence entre les gaz et les liquides ne présente une réelle importance que pour de très grandes hauteurs, quelques dizaines ou quelques centaines de mètres, par exemple.

2. COMPARAISON DES PRESSIONS DANS UN GAZ ET UN LIQUIDE. — Soient un gaz (l'air par exemple) et un liquide (l'eau par exemple) à l'état de repos (fig. 3).

Soit $P_B - P_A$ la différence des pressions en deux points du liquide séparés par une différence de niveau h et $P'_B - P'_A$, la différence des pressions entre deux points du gaz séparés par la même différence de niveau.

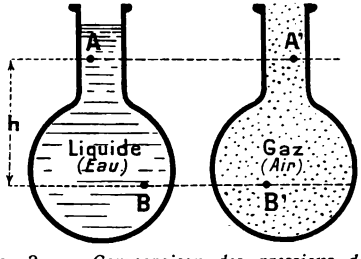


FIG. 3. — *Comparaison des pressions dans les gaz et dans les liquides.*

Prenons $h = 20$ cm pour fixer les idées. Le poids volumique de l'eau étant 1 gf/cm³ nous écrirons :

$$P_B - P_A = 20 \times 1 = 20 \text{ gf/cm}^2.$$

Le poids volumique moyen de l'air étant 0,0013 gf/cm³,

$$P'_B - P'_A = 20 \times 0{,}0013 \simeq 0{,}027 \text{ gf/cm}^2.$$

La différence des pressions est près de

800 fois plus faible : ***la pression en B′ et la pression en A′ sont très voisines.***

C'est ce qui nous a permis de supposer (Leçon 12, § 4) que la pression *atmosphérique* est pratiquement la même, au même instant, au contact des liquides en équilibre, même si les points envisagés ne sont pas rigoureusement dans un même plan horizontal, pourvu que les différences d'altitude restent faibles. A la précision des mesures effectuées à l'intérieur d'une salle c'est parfaitement admissible.

3. LE THÉORÈME D'ARCHIMÈDE EST APPLICABLE AUX GAZ. — Nous avons vu que la poussée d'Archimède était, dans le cas des liquides, la *résultante* de toutes les *forces pressantes* exercées sur le solide immergé. Il doit en être de même pour les gaz, et nous pourrons répéter avec un corps cylindrique maintenu entièrement plongé dans le gaz (fig. 4), les raisonnements déjà vus.

Sans doute la différence des pressions entre les deux faces supérieure et inférieure est-elle *très faible. Elle fournit cependant une faible force verticale* ***f****, dirigée vers le haut, égale au poids d'une colonne gazeuse de hauteur* ***h*** *et de base égale à la base du cylindre.*

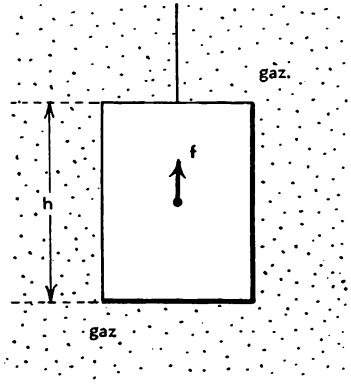


FIG. 4.

Théorème. — ***Tout corps solide entièrement plongé dans un gaz en équilibre reçoit des forces pressantes dont la résultante est définie par les quatre éléments suivants :***

a) **direction :** la résultate est ***verticale;***

b) **sens :** elle est orientée ***vers le haut;***

c) **intensité :** son intensité est ***égale au poids du gaz déplacé;***

d) **point d'application :** son point d'application est le ***centre de gravité du volume gazeux déplacé.***

Le poids volumique moyen d'un gaz étant toujours faible, cette force sera notable seulement dans le cas où le corps qui s'y trouve plongé a un volume important (ballons) Quelques expériences vont nous permettre de vérifier ce théorème.

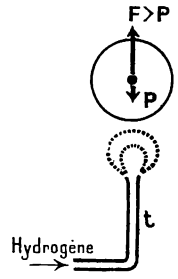


FIG. 5.

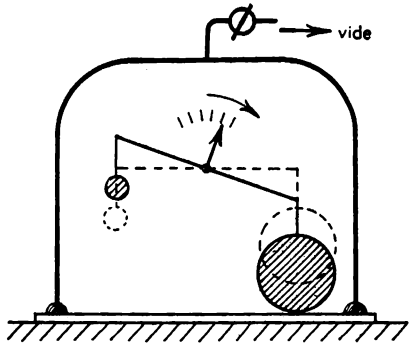


FIG. 6. — *La balance est déséquilibrée quand on retire l'air de la cloche.*

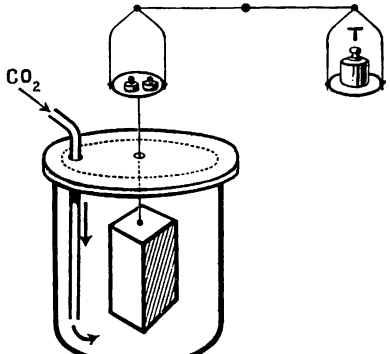


FIG. 7. — *Vérification du théorème d'Archimède appliqué aux gaz.*

a) **Existence d'une poussée verticale, de bas en haut.** — A l'extrémité d'un tube vertical ***t*** (fig. 5) gonflons une bulle de savon à l'hydrogène. Quand la bulle atteint un volume suffisant, elle se détache du tube et s'élève *verticalement*. La poussée de l'air ambiant est devenue supérieure au poids de la bulle, augmenté de la force d'adhérence à l'extrémité du tube *t*.

b) **Baroscope** (fig. 6). — Sous une cloche dans laquelle on peut faire le vide (cloche pneumatique) plaçons une balance équilibrée par des solides de volumes différents. Quand nous faisons le vide sous la cloche, l'équilibre est détruit dans le sens de la flèche. En supprimant l'air autour de l'appareil (appelé *baroscope*), nous avons supprimé les poussées d'Archimède qui s'exerçaient sur les deux objets avec des valeurs *inégales*.

c) **Comparaisons des poussées dans des gaz différents** (fig. 7). — Sous le plateau d'une balance suspendons un solide dont nous connaissons exactement le volume ***V*** (par exemple un parallélépipède de bois dont nous avons mesuré les dimensions [1]). Plongeons le solide dans une cuve profonde munie d'un couvercle de carton et réalisons l'équilibre à l'aide d'une tare convenable *T*.

Remplissons alors complètement la cuve de gaz carbonique. L'équilibre est détruit au profit de la tare. Pour le rétablir, il faut appliquer un poids supplémentaire ***p*** sur le plateau soutenant le solide.

Le poids ***p*** représente la *différence* $\boldsymbol{F' - F}$ des poussées d'Archimède dans le *gaz carbonique* et dans l'*air*. Exprimons cette différence

(1) On peut également prendre un ballon de verre dont on aura préalablement déterminé le volume *extérieur* avec soin. Si la balance est sensible au centigramme, un volume de 2 litres est suffisant.

en désignant par ϖ' le poids volumique du gaz carbonique et par ϖ celui de l'air :

$$F' - F = V\varpi' - V\varpi = V(\varpi' - \varpi).$$

Connaissant V, ϖ', ϖ, nous pouvons calculer numériquement $\boldsymbol{F' - F}$. Nous trouvons que V $(\varpi' - \varpi)$ est *précisément égal* à $\boldsymbol{p}$, compte tenu des erreurs de mesure. Cette expérience vérifie donc le théorème d'Archimède appliqué aux gaz.

APPLICATIONS

4. CORRECTION DE LA POUSSÉE DE L'AIR DANS LES PESÉES. — Reportons-nous à la technique d'une pesée. Qu'il s'agisse d'une pesée de précision (double pesée) ou d'une opération plus grossière (simple pesée), la balance nous permet toujours de constater l'égalité de deux forces :

L'une est le poids *réel* $\boldsymbol{X}$ du corps étudié, *diminué* de la poussée d'Archimède $\boldsymbol{f}$ sur ce corps.

L'autre est le poids *réel* $\boldsymbol{P}$ des masses marquées, *diminué* de la poussée d'Archimède $\boldsymbol{f'}$ sur les objets étalonnés.

Si ϖ et ϖ' sont respectivement le poids volumique du corps et celui des objets marqués, si ϖ_0 est le poids volumique de l'air, les volumes sont $\frac{X}{\varpi}$ pour le corps et $\frac{P}{\varpi'}$ pour les objets marqués. Les poussées d'Archimède ont comme valeurs :

$$f = \frac{X}{\varpi}.\varpi_0 \qquad f' = \frac{P}{\varpi'}.\varpi_0.$$

La pesée permet d'écrire :

$$X - \frac{X}{\varpi}.\varpi_0 = P - \frac{P}{\varpi'}.\varpi_0.$$

Quand on confond X et P, l'erreur absolue est $\Delta X = X - P$; soit :

$$\Delta X = X - P = \frac{X}{\varpi}.\omega_0 - \frac{P}{\varpi'}.\omega_0 = \varpi_0\left(\frac{X}{\varpi} - \frac{P}{\varpi'}\right).$$

Mais X est très voisin de P; on peut donc admettre :

$$\Delta X \simeq \omega_0.X\left(\frac{1}{\varpi} - \frac{1}{\varpi'}\right).$$

Interprétons : Dans une pesée non corrigée de la poussée de l'air, l'erreur absolue est *proportionnelle au poids du corps étudié*; elle est en outre d'autant plus importante *que* ϖ *et* ϖ' *sont plus différents.* Elle dépend donc du corps à peser et de la nature du métal ou de l'alliage avec lequel sont fabriquées les masses marquées. Evaluons son importance numérique dans un cas concret.

Soit un bloc de *sapin* ($\varpi \simeq 0{,}5$ gf/cm³) qui a été pesé avec des objets marqués en laiton ($\varpi' \simeq 8$ gf/cm³); on a trouvé un poids P = 1 000 gf. L'erreur est :

$$\Delta X \simeq 0{,}0013 \times 1\,000 \left(\frac{1}{0{,}5} - \frac{1}{8}\right) \simeq 2{,}3 \text{ gf.}$$

La valeur exacte de X est donc : X = 1 002,3 gf; la correction n'est pas négligeable, même si on a employé une balance de Roberval.

Pour la pesée d'un bloc de *verre* (poids volumique voisin de 2,5 gf/cm³), si le poids non corrigé est 100 gf, l'erreur est :

$$\Delta X \simeq 0{,}0013 \times 100 \left(\frac{1}{2{,}5} - \frac{1}{8}\right) \simeq 0{,}036 \text{ gf.}$$

Si la balance est sensible au centigramme, il est indispensable de faire la correction [1].

5. AÉROSTATS (fig. 8). — Les **aérostats** ou **ballons** sont des enveloppes de très grand volume, remplies de gaz léger, dont le poids total P (enveloppe, gaz, passagers et accessoires) est inférieur au poids F de l'air qu'ils déplacent. Ils sont donc soumis à une force verticale F — P dirigée vers le haut.

Cette force est appelée *force ascensionnelle*; elle permet à l'appareil de s'élever.

a) **Description.** — Les ballons sphériques qui eurent une vogue très importante il y a cent ou cent cinquante ans dérivent de la célèbre « Mongolfière » en toile et papier, imaginée sous Louis XVI par les frères MONTGOLFIER, et gonflée à l'air chaud.

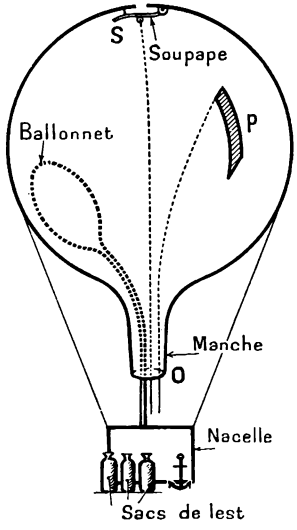


FIG. 8. — *Ballon sphérique.*

Un ballon sphérique comprend une *enveloppe* formée de plusieurs épaisseurs de tissu gommé ou caoutchouté qui la rend imperméable aux gaz légers (hydrogène). Supposons, pour simplifier, cette enveloppe indéformable.

b) **Force ascensionnelle au sol.** — Prenons le diamètre du ballon égal à 12 m, son volume est :

$$V = \frac{4}{3} . \pi . 6^3 \simeq 900 \text{ m}^3.$$

La poussée de l'air est :

$$F = 1{,}3 \times 900 \simeq 1\,170 \text{ kgf.}$$

Supposons le ballon rempli d'hydrogène dont un mètre cube pèse 0,08 kgf.

Le poids du gaz est :

$$p_1 = 0{,}08 \times 900 = 72 \text{ kgf.}$$

(1) Rappelons que les indications gravées ou imprimées sur les *étalons* ou *objets marqués* d'une boîte sont les *masses* de ces objets. La balance, en un lieu donné, permet la comparaison des masses en comparant les poids qui leur sont proportionnels. **Le résultat n'est correct que si on opère dans le vide, ou si l'on fait la correction de poussée de l'air.**

Si le poids total de l'enveloppe, de la nacelle, des passagers et des instruments de bord est $p_2 = 400$ kgf, l'*excédent* de la poussée de l'air sur le poids est :

$$f = F - (p_1 + p_2) = 1\,170 - 472 \simeq 698 \text{ kgf.}$$

Une force si importante provoquerait un départ beaucoup trop rapide, et même dangereux pour l'organisme des passagers; une *force ascensionnelle au départ* d'une vingtaine de kilogrammes-force suffit pour que le ballon s'élève dans de bonnes conditions.

On pourra donc surcharger l'appareil, au départ, d'environ :

$$698 - 20 = 678 \text{ kgf.}$$

Cette surcharge est emportée sous forme de *lest*, fractionné habituellement en un certain nombre de sacs de sable suspendus à la nacelle (fig. 8).

c) **Montée et plafond.** — Le ballon, en s'élevant, rencontre des couches atmosphériques où l'air, en se raréfiant, a un poids volumique de plus en plus faible (§ 1). La poussée d'Archimède diminue constamment, et il arrive un moment où *la force ascensionnelle devient nulle*; le ballon a atteint son **plafond.**

Un ballon complètement fermé n'atteindrait jamais son plafond. En effet, pendant l'ascension, comme l'air se raréfie, la pression qu'il exerce sur l'enveloppe diminue de plus en plus (§ 1); le gaz intérieur tend de plus en plus l'enveloppe et finit par provoquer l'éclatement.

Pour éviter cela, le gaz communique avec l'atmosphère par un long tuyau, la **manche** (fig. 8). Au niveau de l'ouverture O, la pression du gaz est donc égale à la pression de l'air, et pendant toute la durée de l'ascension le gaz s'échappe lentement pendant que l'enveloppe sphérique reste normalement tendue.

d) **Le ballon ne peut se maintenir à son plafond.** — Théoriquement un ballon devrait pouvoir se maintenir à son plafond avec une force ascensionnelle nulle; mais il faut compter avec les fuites inévitables du gaz. Dès qu'une fuite, même légère, se produit, l'enveloppe moins tendue diminue de volume; la poussée d'Archimède F devient plus faible que le poids total P; l'appareil descend. Mais comme du gaz a été perdu pendant la montée, l'enveloppe devient de plus en plus flasque et la *descente s'accélère.* (Nous nous trouvons dans un cas analogue à l'équilibre impossible du sous-marin immobile en plongée : leçon 14, § 12). Il faut alors jeter du lest pour acquérir de nouveau de la force ascensionnelle.

Un ballon sphérique *monté* se déplace donc, au gré du vent, par *bonds* successifs en perdant à chaque bond un peu de son lest, *réserve de force ascensionnelle.*

e) **Descente. Retour au sol.** — Quand l'aéronaute désire redescendre rapidement, il peut laisser échapper du gaz par une *soupape* S située au sommet de l'enveloppe et commandée de la nacelle par une corde. Si, par suite du déséquilibre qui va en s'accentuant, la descente risque de se transformer en chute, il envoie à l'aide d'une pompe de l'air dans un *ballonnet* intérieur (fig. 8) qui se gonfle et qui, pressant sur le gaz voisin, redonne au ballon sa forme sphérique.

Quand le ballon touche le sol, on peut craindre qu'il soit traîné dangereusement à cause de la surface importante qu'il offre au vent. Dans ce cas, on le dégonfle presque instantanément en ouvrant un *panneau de déchirure* ***p***.

Les ballons sphériques montés ne se rencontrent plus guère que dans certaines compétitions sportives particulièrement spectaculaires au départ.

6. BALLONS D'OBSERVATION. BALLONS-SONDES. DIRIGEABLES.

— Les **ballons d'observation** ou « **saucisses** » ont une forme allongée avec de gros bourrelets extérieurs qui leur donnent une bonne stabilité au vent. Ils sont reliés par un câble à un treuil placé à terre qui permet de les déplacer et de régler leur altitude.

Les **ballons-sondes** sont destinés à des usages scientifiques et de plus en plus employés en météorologie. Ils emportent dans leur nacelle des instruments de mesures (thermomètres, baromètres, hygromètres, actinomètres, etc.) qui enregistrent la température, la pression, l'humidité de l'air, le rayonnement solaire... aux différentes couches atmosphériques rencontrées. Avec leur enveloppe en caoutchouc mince et très élastique, complètement fermée et remplie d'hydrogène, ils se présentent comme d'énormes bulles de savon! Ils s'élèvent en augmentant de volume à cause de la raréfaction de l'atmosphère et éclatent à une altitude qui dépasse souvent 30 km; un parachute s'ouvre alors, maintenant la nacelle qui retourne lentement au sol.

Les **dirigeables** sont constitués en général d'une carcasse rigide, légère, en forme de long cigare, pour mieux diminuer la résistance de l'air pendant leur voyage et recouverte d'une enveloppe imperméable à l'eau. A l'intérieur sont logés, dans des alvéoles, de nombreux ballonnets indépendants *incomplètement remplis* d'hydrogène ou d'hélium; ces ballonnets peuvent donc se dilater librement pendant la montée et reprendre leur forme initiale pendant la descente.

Certains dirigeables propulsés par de puissants moteurs, ont pu effectuer de longues croisières. Aujourd'hui ils sont complètement supplantés par les avions.

EXERCICES

1. L'air atmosphérique pèse en moyenne, au voisinage du sol, 1,3 gf par litre. Quelle est la différence des pressions créées par l'air au sol et au sommet de la Tour Eiffel, de hauteur 300 m?

Rép. : 39 gf/cm^2.

2. On gonfle une bulle de savon en prélevant 0,1 g d'eau savonneuse. Quel doit être le volume de la bulle, gonflée d'hydrogène (densité : 0,07) pour qu'elle se maintienne en équilibre dans l'air?

Rép. : $V \simeq 82{,}6$ cm^3.

3. Quel rayon faudrait-il donner à une sphère creuse en aluminium, d'épaisseur $\frac{1}{10}$ mm, de densité 2,6, remplie d'hydrogène de densité 0,07, pour qu'elle puisse s'élever dans l'air?

Rép. : 65 cm.

4. Un ballon de volume extérieur 1 *l*, suspendu sous le plateau d'une balance sensible au décigramme, est plongé successivement dans l'air et dans une cuve contenant du gaz carbonique de densité 1,5. L'équilibre subsiste-t-il? (Masse spécifique de l'air : 1,3 g/dm^3).

Rép. : non; différence des poussées d'Archimède : 0,65 gf.

5. On achète 12 kg de liège (densité : 0,3) pesés avec des objets marqués en métal (densité : 8). Quel est la masse réelle du liège acheté?

Rép. : 12 050 g.

6. Un instrument pour la mesure des densités des gaz comporte un ballon scellé de volume 2 litres suspendu à l'extrémité d'un fléau à 20 cm du point d'appui, et équilibré par un contrepoids. L'équilibre est réalisé dans l'air à 0°.

Le ballon est plongé dans du gaz carbonique à 0°; montrer qu'on peut rétablir l'équilibre en déplaçant sur le fléau un cavalier de poids 3 gf.

La densité du gaz carbonique par rapport à l'air est 1,54 et le poids du litre d'air 1,3 gf : à quelle distance du point d'appui doit se trouver le cavalier?

PROBLÈME

Un ballon complètement clos, contient 70 kg d'hydrogène dont la masse volumique, dans les conditions de l'expérience, est 0,0001 g/cm³. L'enveloppe de la nacelle et son contenu pèsent en tout 720 kgf, le lest 100 kgf. On supposera que le volume total est invariable et égal à celui de l'hydrogène. La masse volumique de l'air, au niveau du sol est 1,3 kg/m³ et diminue, en moyenne, de 0,02 g par litre quand on s'élève de 200 mètres.

1° Calculer la force ascensionnelle au sol.

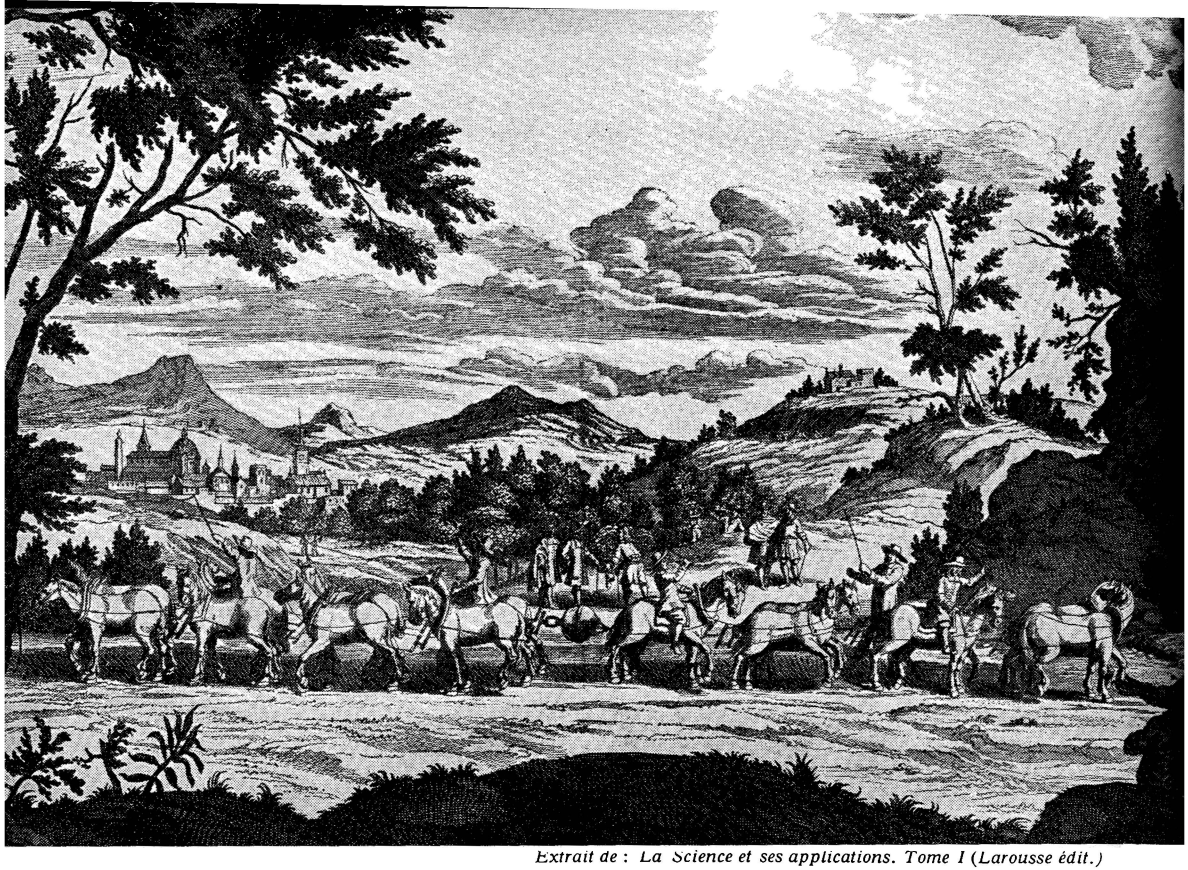
2° Si le ballon, relié au sol par une longue corde dont le poids est de 50 gf/m, s'élevait verticalement, quelle hauteur atteindrait-il en conservant son lest?

3° Ayant complètement abandonné son lest et la corde, le ballon est maintenu à l'altitude 100 mètres par un câble dont on négligera le poids, qu'on supposera rectiligne et incliné à 30° sur le plan horizontal, à cause de l'action du vent, dont la direction est horizontale.

a) Quelle est la force de traction exercée par le câble?

b) Quelle est la force exercée par le vent?

4° Quelle est, à 10 % près, la puissance du moteur d'un treuil de halage, capable de ramener le ballon au sol en une minute? Rendement du treuil : 0,8



Extrait de : La Science et ses applications. Tome I (Larousse édit.)

FIG. 1. — *Expérience d'Otto de Guéricke sur la pression de l'air atmosphérique à Magdebourg* (Document ancien.)

Rien ne fait mieux connaître l'air que là où il n'est pas.
FONTENELLE. (1)

16. PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

1. ORIGINE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — Notre vie se déroule dans un milieu gazeux, l'air, dont les effets se font surtout sentir par ses mouvements (vent) et par la résistance que nous éprouvons parfois à nous déplacer (à bicyclette, en auto, etc.).

Ce milieu, appelé **atmosphère,** est *pesant* et les molécules qui le constituent (azote, oxygène principalement) n'échappent pas à l'agitation continuelle et désordonnée de tous les gaz. Comme tous les gaz en équilibre, l'air *calme* doit exercer sur toute surface solide qu'il baigne des forces pressantes. Il faut donc prévoir, en tout lieu, l'existence d'une *pression atmosphérique.* Différentes expériences permettent :

a) d'en vérifier l'existence;
b) d'en effectuer la mesure.

(1) FONTENELLE (V. notice biographique).

2. EXISTENCE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — 1. **Expérience du crève-vessie.** — *a*) Sur un manchon de verre (fig. 2, *a*), tendons une membrane de *parchemin.* Plaçons le manchon sur la platine d'une machine pneumatique et faisons le vide sous cette cloche improvisée.

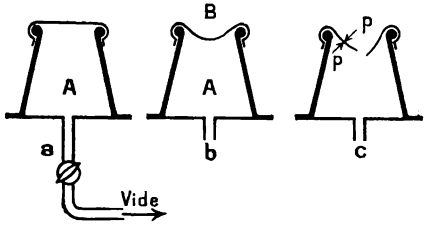


FIG. 2. — *Expérience du crève-vessie.*

b) Aussitôt la membrane s'incurve (fig. 2, *b*). Nous avons réalisé ici une réplique de la capsule manométrique qui nous a servi à étudier la pression dans les liquides (Leçon 12, § 2). Si la membrane s'incurve quand nous supprimons une partie de l'air que contient la cloche A, c'est qu'elle reçoit seulement de la part de l'air extérieur en B une *pression* : la **pression atmosphérique.**

c) Si nous continuons à raréfier l'air dans la cloche, la *force* qui déforme la membrane peut finalement la déchirer (fig. 2, *c*). A partir de cet instant, chacun des fragments ne se déforme plus; c'est qu'il reçoit, sur ses deux faces, la *même pression* ***p***.

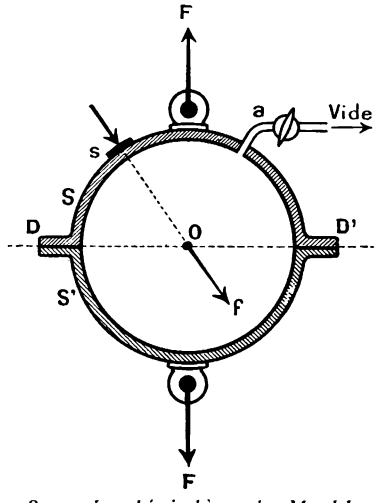


FIG. 3. — *Les hémisphères de Magdebourg.*

Ainsi pouvons-nous comprendre pourquoi des corps comme une plaque de carton, une feuille d'arbre, soumis constamment dans l'air aux forces dues à la pression atmosphérique ne sont pas déformés ou brisés. C'est que la pression atmosphérique, comme toute pression créée par un fluide, se manifeste en chaque point dans tous les sens, et en particulier *sur les deux faces* d'une feuille; cette pression passe donc inaperçue. Fontenelle disait avec raison : « *Rien ne fait mieux connaître l'air que là où il n'est pas* ».

2. **Hémisphères de Magdebourg.** — Deux demi-sphères S et S', de même rayon, peuvent s'appliquer exactement l'une contre l'autre (fig. 3).

Faisons le vide entre elles par la tubulure ***a***. Il faut ensuite, pour séparer les deux parties de l'appareil, exercer une force F considérable. Si le vide est parfait dans la sphère creuse, chaque centimètre carré de surface S subit de la part de l'air extérieur une force *f* numériquement égale à la pression atmosphérique. Cette force, normale à la surface, donc dirigée suivant un rayon de la sphère, passe par le centre O où nous pouvons transporter son point d'application. Toutes les forces analogues à *f* sont donc concourantes en O et, par raison de symétrie, fournissent comme résultante la force F normale au plan diamétral DD'.

Dans une expérience historique, effectuée près de Magdebourg, par OTTO DE GUÉRICKE [1] en 1654, les hémisphères avaient 35 cm de diamètre; 8 chevaux tirant ensemble sur chacun d'eux ne parvenaient pas à les décoller, et cependant un vide parfait n'avait pu être fait à l'intérieur (fig. 1). (Exercice N° 9.)

Cette expérience est une nouvelle preuve expérimentale de l'existence de la pression atmosphérique.

3. EXPÉRIENCE DE TORRICELLI [2]; MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

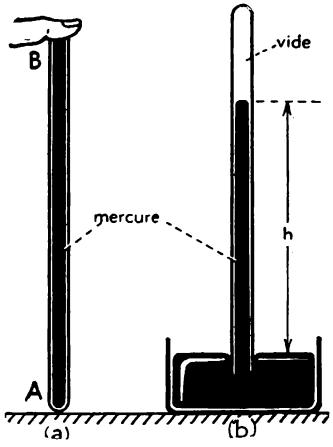


FIG. 4. — *Expérience de Torricelli.*

1. Prenons un tube de verre AB de quelques millimètres de rayon intérieur, d'environ un mètre de longueur, fermé à une extrémité. Remplissons-le *complètement* de mercure en évacuant soigneusement toute bulle d'air (fig. 4, *a*). Fermons-le avec le doigt, retournons-le sur la cuve à mercure et enlevons le doigt de l'orifice B. Aussitôt le mercure se détache de l'autre extrémité et vient se fixer à une certaine hauteur ***h*** au-dessus du mercure de la cuve (fig. 4, *b*).

2. Donnons au tube des inclinaisons différentes; remplaçons-le par des tubes de forme quelconque (fig. 5) nous constatons que la hauteur *verticale* ***h*** qui sépare les deux niveaux du mercure est *la même au même moment pour toutes les positions et pour tous les tubes.* Elle est, au niveau de la mer, voisine de 75 à 77 cm.

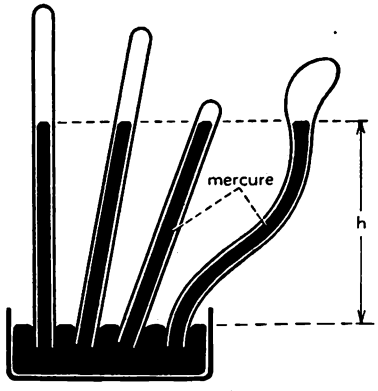


FIG. 5. — *C'est la hauteur* ***h*** *qui caractérise la pression atmosphérique.*

3. Cela ne veut pas dire que cette hauteur est invariable. Si l'observation se prolonge pendant quelques heures on peut noter parfois des variations de *quelques millimètres*, parfaitement mesurables, de la hauteur ***h.***

4. **Interprétons :**

Dès que le mercure est devenu immobile

(1) OTTO DE GUERICKE.
(2) TORRICELLI (V. notices biographiques).

dans l'un quelconque des tubes utilisés, nous sommes en présence d'un fluide en équilibre auquel s'applique le *Principe fondamental de l'Hydrostatique.* Exprimons la différence des pressions entre les points *B* et *A* (fig. 6). Si ϖ est le poids volumique du mercure :

$$P_B - P_A = \varpi . h. \qquad [1]$$

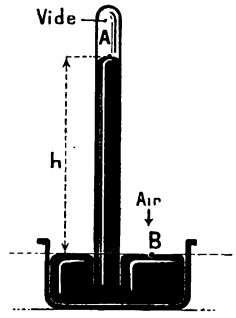


FIG. 6. — *Calcul de la pression atmosphérique.*

Que représentent donc P_B et P_A?

P_A est une pression *nulle*, car au-dessus de A il y a le *vide.*

P_B est due à la présence, à ce niveau, des molécules de l'air; c'est donc la pression atmosphérique. Désignons-la par H. La relation [1] devient :

$$\boxed{H = \varpi . h.} \qquad [2]$$

pression atmosphérique

Comme ϖ est connu, on voit que la mesure de la pression atmosphérique H se ramène à une mesure de *longueur.*

Exemple : *Soit* $h = 75\ cm$ *et* $\varpi \simeq 13{,}6\ gf/cm^3$. *La pression atmosphérique est donc :*

$$H \simeq 13{,}6 \times 75 = 1\,020\ gf/cm^2.$$

La pression atmosphérique ne s'éloigne jamais beaucoup de ***1 kgf/cm²*** *ou encore* $10^5 N/m^2$.

Nous venons ainsi de construire le plus simple des *baromètres*, mais nous verrons bientôt comment cet appareil a été perfectionné pour servir à des mesures précises.

4. UNITÉS. — L'une quelconque des unités de pression déjà définies (Leçon 11, § 2) permet d'évaluer la pression atmosphérique; voici cependant les plus employées :

1. Millibar. — Les *Météorologistes* utilisent le plus souvent le *millibar* ***(mb)***; *le millibar vaut* 1 000 *baryes.* Ainsi on peut lire dans les bulletins publiés par l'Office National Météorologique, pour la prévision du temps : pression atmosphérique : 995 millibars. Ils emploient aussi, plus rarement, le *bar*; *un bar vaut* 1 000 *millibars*, c'est-à-dire 10^6 baryes.

2. Hauteur de mercure normal. — Les *Physiciens* trouvent généralement plus pratique d'évaluer la pression atmosphérique en *hauteur de mercure.* Ils disent, par exemple : « la pression atmosphérique est de 745 mm de mercure », ce qui signifie : *la pression atmosphérique est équilibrée, au niveau horizontal du mercure dans la cuvette d'un baromètre, par une colonne de mercure de* 745 *mm de hauteur* située dans le tube.

Basé sur la signification de la formule [2], ce langage est commode, mais présente un inconvénient : il suppose que le poids volumique ϖ du mercure est connu et invariable. Or ϖ dépend en particulier de la température (voir *Dilatation des liquides* : leçon 20). Si on veut être précis, il est indispensable de définir une *température de référence*, à laquelle on rapportera le poids volumique du mercure. On choisit la température de *zéro degré* : 0 °C. *Le mercure à* 0 °C *est dit mercure* **normal.** *Son poids volumique, à Paris, est* $\varpi = 13{,}595$ gf/cm³.

5. LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE NORMALE, PRESSION DE RÉFÉRENCE.

1. **Pression atmosphérique normale.** — Nous avons dit que la hauteur h du mercure dans le tube barométrique pouvait varier entre certaines limites, même dans un intervalle de temps relativement court. Mais comme, au bord de la mer, et quelles que soient les circonstances, la hauteur h ne varie pas de plus de quelques centimètres autour d'une valeur moyenne de 76 cm, *on a convenu d'appeler* **pression atmosphérique normale** *la pression qui équilibre une colonne de mercure normal de* **76** *cm de hauteur.*

Nous désignerons par H_0 la valeur de la pression atmosphérique normale.

2. **L'atmosphère *(atm)*, nouvelle unité de pression.** — Comparons la pression atmosphérique normale aux unités de pression déjà rencontrées. Exprimée en kgf/cm² elle vaut :

$$H_0 = 13{,}595 \times 76 = 1\,033 \text{ gf/cm}^2 \simeq \mathbf{1\ kgf/cm^2}.$$

Exprimée en N/m², elle vaut (1 kgf = 9,81 N; 1 m² = 10^4cm²) :

$$H_0 = 1{,}033 \times 9{,}81 \times 10^4 \simeq \mathbf{1{,}013 \times 10^5\ N/m^2}.$$

Exprimées en baryes (1 barye = 1/10 N/m²) et en millibars :

$$H_0 = 1{,}013 \times 10^6 \text{ baryes} \simeq \mathbf{1\,013\ mb}.$$

On voit, en particulier, que la pression atmosphérique normale est très voisine du kilogramme-force par centimètre carré, unité très employée dans l'industrie. Aussi, dans la Physique appliquée à la vie courante et dans l'industrie, où une très grande précision n'est pas exigée des calculs, on prend souvent comme unité de pression la pression atmosphérique normale. Cette unité pratique s'appelle l'***atmosphère (atm).***

Nous résumerons ainsi les résultats à retenir :

1 atmosphère (atm)	= 76 cm de mercure normal	(*Physique*)
	≃ 1 000 mb	(*Météorologie*)
	≃ 1 kgf/ cm² ou 10^5N/m²	(*Physique industrielle*).

EXERCICES

1. Calculer en kilogrammes-force la force subie par un côté de la membrane, supposée plane, d'un crève-vessie, un jour où la pression atmosphérique est 75 cm de mercure. (Diamètre de la membrane : 10 cm.) Rép. : 80 kgf.

2. Quelle pression reçoit de la part de l'air le plafond d'une salle? Quelle force subit-il sachant que ses dimensions sont 4 m × 4 m?
Rép. : 1 kgf/cm²; 160 000 kgf.

3. Quelle devrait être la hauteur d'un tube de Torricelli qu'on remplirait d'eau?

Rép. : 10,33 m. au minimum.

4. « La pesanteur de l'air, écrivait Pascal, est la cause de l'enflure de la chair, quand on applique des ventouses. » Expliquez.

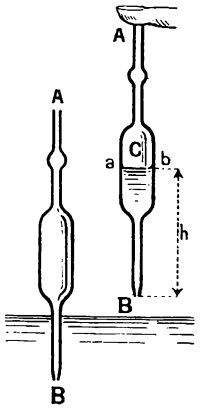


FIG. 7.

5. Fonctionnement d'une pipette de laboratoire (fig. 7).

a) En aspirant par l'orifice A d'une pipette, l'orifice B étant plongé dans un liquide, on constate que le liquide monte dans la pipette. Expliquez pourquoi.

b) En fermant alors avec le doigt l'orifice A, on peut retirer B hors du liquide et celui-ci reste dans la pipette, s'élevant d'une hauteur *h*. Cette hauteur dépend-elle du diamètre *ab* de l'ampoule?

c) Quelle est la pression de l'air en C si le liquide est une solution acide de densité 1,2, si la hauteur *h* est 15 cm et si la pression atmosphérique est 75 cm de mercure?

d) Analyser ce qui arrive si on laisse entrer un peu d'air en soulevant le doigt en A.

Rép. : *c*) 73,7 cm de mercure.

6. Calculer en millibars, en kgf/cm², en N/m² la pression atmosphérique qui équilibre 72 cm de mercure normal.

Rép. : 960 mb; 0,98 kgf/cm²; 98 000 N/m².

7. Quelle serait la hauteur de l'atmosphère correspondant à une pression de 76 cm de mercure si l'air avait, à toute altitude, une masse volumique de 1,3 mg par centimètre cube? Rép. : 7,9 km.

8. Montrer que la force nécessaire pour séparer deux hémisphères de Magdebourg entre lesquels on a fait un vide parfait est égale à la force exercée par l'atmosphère sur une surface plane égale à la section diamétrale de la sphère.

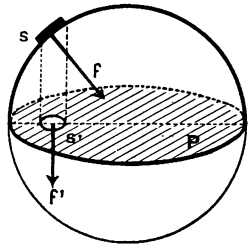


FIG. 8.

(En composant toutes lesf orces dues à la pression atmosphérique, on n'oubliera pas qu'elles s'exercent normalement aux parois de la sphère. On montrera que la force $\vec{f}$ appliquée à un élément de surface *s* (fig. 8) produit le même effet qu'une force $\vec{f'}$ due à la pression atmosphérique sur la *projection s'* de *s* dans le plan diamétral P.)

9. Calculer numériquement la force à exercer pour séparer deux hémisphères de diamètre 10 cm, entre lesquels l'air est à une pression égale au $\frac{1}{4}$ de la pression normale extérieure. Rép. : 58,8 kgf.

PROBLÈME

Un tube de Torricelli vertical, de section extérieure 2 cm², de section intérieure 1 cm² plonge dans une cuve contenant du mercure, de section 52 cm². La hauteur du mercure dans le tube, au-dessus du mercure dans la cuvette est $h = 75$ cm; la hauteur totale du tube au-dessus du mercure de la cuvette est 1 mètre.

1° Quelle est la longueur de la chambre barométrique quand on incline le tube de 30° sur la verticale, sans le soulever ni l'enfoncer?

2° Quelle serait la variation de la hauteur *h* si on transportait l'appareil au sommet de la Tour Eiffel?

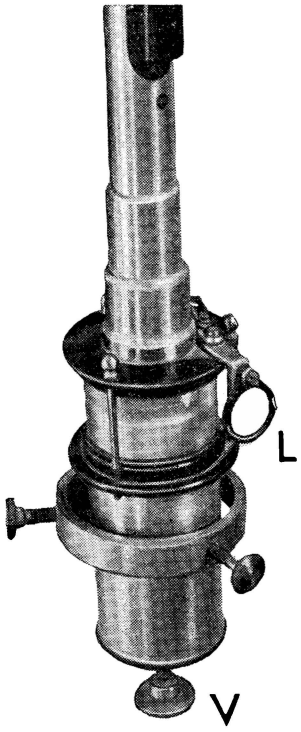
3° La hauteur *h* étant de 75 cm on verse dans la cuve une couche d'acide sulfurique d'épaisseur 4 cm. De combien varie le niveau supérieur du mercure dans le tube?

Masse volumique du mercure dans les conditions de l'expérience : 13,6 g/cm³.

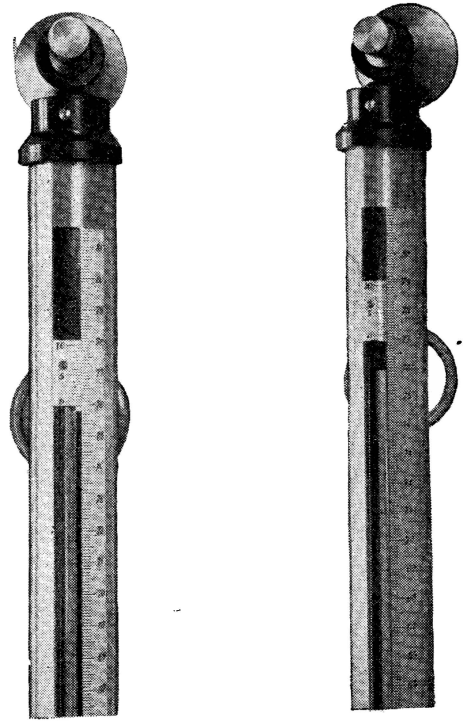
Masse volumique de l'air entre la base et le sommet de la Tour Eiffel : 1,3 mg/cm³.

Densité de l'acide sulfurique : 1,8.

Hauteur de la Tour Eiffel : 300 mètres.



Cuvette d'un baromètre de Fortin. *La loupe* **L** *permet de mieux juger de l'affleurement de la pointe en émail blanc à la surface du mercure. La vis* **V** *règle cet affleurement.*



Partie supérieure d'un baromètre de Fortin :
à gauche *: le vernier est en place, pour une lecture.*
à droite *: le vernier a été soulevé pour montrer le niveau du mercure.*
Un miroir, installé derrière la colonne, améliore l'éclairage.

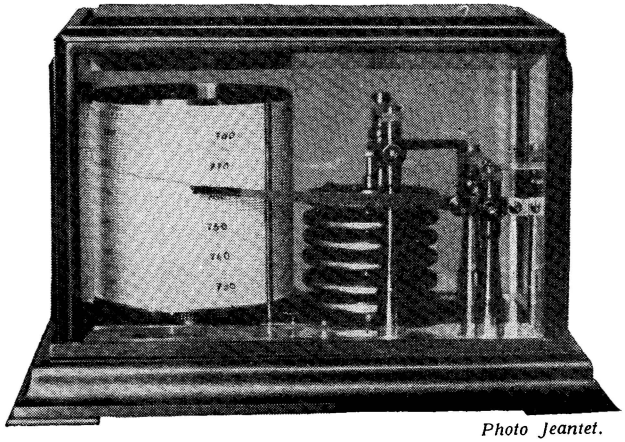


Photo Jeantet.

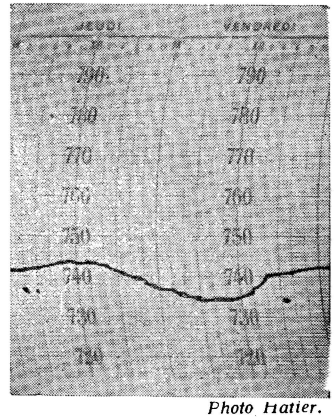


Photo Hatier.

Baromètre enregistreur *et fragment d'une* ***feuille d'enregistrement.***

17. BAROMÈTRES

1. Les **baromètres** servent aux mesures de la pression atmosphérique.

On distingue deux types :

a) Les ***baromètres à mercure.*** — Par construction ils ramènent la mesure de la pression atmosphérique à celle de la *hauteur* d'une colonne de mercure qui lui fait équilibre. Ce sont donc de véritables tubes de Torricelli adaptés aux déterminations précises.

b) Les ***baromètres métalliques.*** — Ils ramènent la mesure de la pression atmosphérique à celle d'une *force pressante* sur une paroi déformable. Moins précis que les précédents, ils sont d'un emploi plus commode.

A. BAROMÈTRES À MERCURE

2. BAROMÈTRES A CUVETTE, A SIPHON. — Le plus simple des baromètres à mercure est le ***baromètre à cuvette large*** (fig. 1). Le tube a un diamètre intérieur de 6 à 10 millimètres et plonge dans une cuvette dont le diamètre intérieur peut être de 8 à 10 centimètres. Une légère variation du niveau du mercure dans le tube n'entraîne qu'un déplacement insignifiant du niveau ***n...n'*** du mercure dans la cuve. On peut donc munir l'appareil d'une règle ***R,*** graduée seulement dans sa partie supérieure mais dont, par construction, le *zéro* est réglé sur le niveau moyen du mercure de la cuvette. Les lectures de la hauteur barométrique ***h*** se font directement avec une incertitude absolue de 1 mm environ.

Pour des mesures plus précises, il faut que les deux surfaces libres du mercure dans le tube et hors de celui-ci soient *planes* et non courbes comme cela arrive dans les tubes étroits (Leçon 13, § 1). On donne à ces deux surfaces la même forme, pratiquement plane, dans les tubes de même diamètre du ***baromètre à siphon*** (fig.1). La mesure plus précise de la dénivellation ***h*** demande alors le repérage minutieux de deux niveaux.

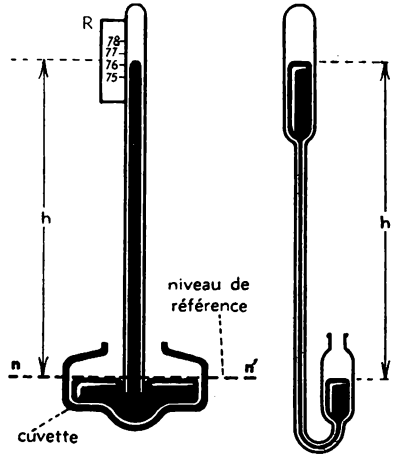


FIG. 1. — *Baromètre à cuvette; baromètre à siphon.*

Un baromètre de ce type, très perfectionné, est installé au Bureau International des Poids et Mesures. Moyennant de multiples précautions et des corrections indispensables, la mesure de la pression atmosphérique s'effectue à $\frac{1}{50}$ mm de mercure près. Ce baromètre étalon est appelé *baromètre normal.*

3. LE BAROMÈTRE DE FORTIN. — Le baromètre de *Fortin*, très employé dans les laboratoires, répond au schéma de la figure 2. La cuve possède un **double fond :** un fond *fixe* en *métal* M sert de support à un *fond mobile en cuir* C. Au moment d'une mesure, on doit, par la manœuvre d'une vis V, amener le niveau du mercure de la cuve au contact d'une *pointe fixe* **a.**

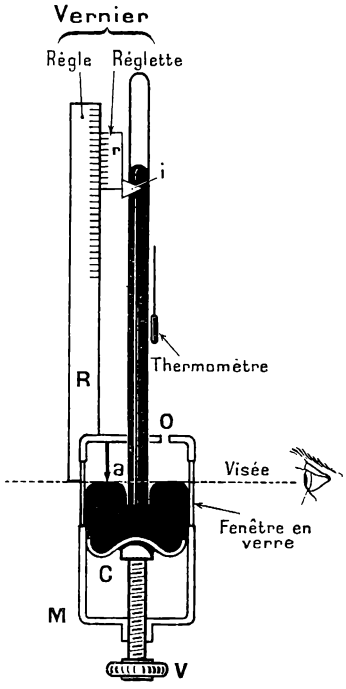


FIG. 2. — *Baromètre de Fortin.*

Le zéro d'une règle fixe R coïncide par construction avec **a.**

Une **réglette mobile r** glisse le long de R; elle porte un index *i* qu'on amène exactement au niveau du mercure dans le tube barométrique. Sa graduation en fait une véritable réglette de *vernier* (T. P. nº 2).

La hauteur *h* se lit donc au vernier, directement, à 1/10 de mm près.

L'orifice O, par lequel la cuve communique avec l'atmosphère, peut être obturé pour le transport de l'instrument.

Un *thermomètre* indique la température et permet d'en tenir compte pour effectuer la correction correspondante.

Les photographies de la page 192 montrent les détails d'organisation de la cuvette et de la partie supérieure d'un baromètre de Fortin.

Nous venons d'étudier trois appareils dérivant du même principe; chacun d'eux est adapté à un besoin particulier. Ils présentent en commun des **qualités** et **défauts.**

Ils sont *justes;*
Ils sont *fidèles;*

Ils sont *sensibles*, et nous avons vu que leur sensibilité ne dépend que du dispositif employé pour la mesure d'une longueur verticale. Par exemple, on peut, au *baromètre normal*, mesurer la pression atmosphérique à 1/100 mm de mercure près.

Il serait d'ailleurs illusoire de pousser plus loin la recherche de la sensibilité dans cette mesure, des *variations locales supérieures à ce chiffre* pouvant avoir lieu, sous des influences diverses, en un temps très court.

Ils sont *encombrants* et *peu maniables.*

B. BAROMÈTRES MÉTALLIQUES

4. — Dans ces appareils, on oppose aux forces dues à la pression atmosphérique sur des parois métalliques déformables d'autres forces dues à des *ressorts*. Dans tous les modèles, les faibles déformations sont rendues visibles grâce à un **système amplificateur.**

La figure 3 en fait comprendre le fonctionnement. L'élément essentiel est une **boîte cylindrique** B, absolument *vide de tout gaz*, fermée par un couvercle C, portant des *cannelures* concentriques. Un **ressort** R à l'intérieur ou à l'extérieur de la boîte (ici à l'intérieur) empêche celle-ci d'être écrasée par la pression atmosphérique.

Si la pression vient à augmenter, par exemple, le couvercle s'affaisse légèrement comprimant le ressort R; sa déformation est transmise par la tige *t* à l'extrémité A d'une **aiguille** articulée en O dont l'autre extrémité *a* se déplace devant un **cadran** gradué.

Il est indispensable de graduer l'appareil *par comparaison* avec un baromètre à mercure; on peut alors graduer directement le cadran en pressions évaluées en centimètres ou millimètres de mercure.

De nombreux instruments de ce genre ont été construits (*baromètres d'appartements*). Ils diffèrent par la forme du ressort R, et par le dispositif d'amplification qui utilise des associations de leviers parfois compliquées.

L'avantage de ces baromètres à aiguille est de pouvoir aisément se transformer en *baromètres enregistreurs.*

Le ***baromètre enregistreur de Richard*** est constitué par plusieurs boîtes identiques superposées B_1, B_2, B_3... (en général, 8) réunies par des tiges t_1, t_2, t_3... de longueur fixe (fig. 4). Le déplacement du point A est ainsi beaucoup plus grand et se trouve encore amplifié par un système de leviers qui commande l'aiguille.

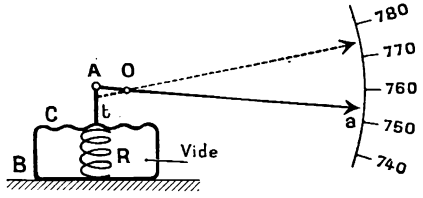


FIG. 3. — *Baromètre métallique.*

Celle-ci inscrit ses indications, à l'aide d'une plume à réservoir d'encre, sur une feuille de papier portée par un **tambour** qu'un mouvement d'horlogerie entraîne à vitesse uniforme à raison d'un tour par semaine. Un réseau de coordonnées est établi sur le papier (*axes courbes des pressions* pour correspondre au déplacement de la plume sur une circonférence de centre O; *axes rectilignes des temps*). On voit par exemple que le lundi, à 6 heures, la pression atmosphérique était de 765 mm de mercure.

La figure de la page 192 donne une vue d'ensemble de l'appareil.

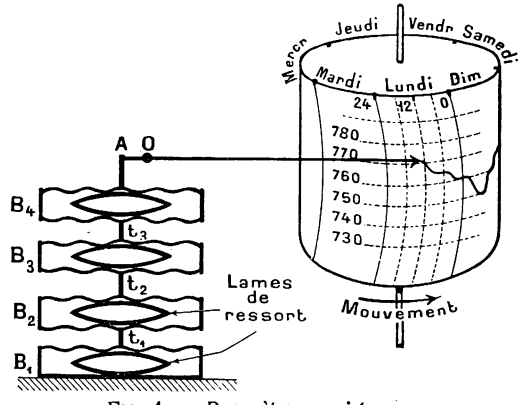


FIG. 4. — *Baromètre enregistreur.*

Les baromètres métalliques ne permettent pas, comme les baromètres à mercure, de calculer la valeur de la pression atmosphérique par une mesure directe. Ce ne sont pas des appareils *absolus*. Avant d'entrer en service, ils doivent être étalonnés par comparaison avec un baromètre à mercure. Ce sont donc des ***appareils relatifs***.

Ils sont *sensibles*, et on peut, à volonté, augmenter leur sensibilité par un système convenable de leviers.

Ils sont *peu fidèles*, car leurs indications dépendent de l'élasticité des ressorts antagonistes et nous savons que l'élasticité des métaux varie avec le temps et avec les actions déjà subies. Il faut donc de temps en temps contrôler ces indications par celles d'un bon baromètre à mercure.

Ils sont par contre *peu encombrants* et *transportables*. D'un emploi commode, les modèles enregistreurs permettent de suivre les variations de la pression atmosphérique en fonction du temps.

Ils ne servent jamais à des mesures de précision.

5. UTILITÉ DES MESURES BAROMÉTRIQUES.

1. **Dans les mesures physiques,** il est très souvent utile de connaître la pression atmosphérique. Nous comprendrons plus tard tout l'intérêt de cette détermination. Signalons seulement quelques exemples, où elle intervient directement :

Pesées de haute précison.

Calcul de la masse d'un certain volume de gaz (Leçon 22).

Graduation d'un thermomètre (Leçon 19).

2. **La pression atmosphérique dépend de l'altitude : altimètres** — La pression atmosphérique en un point P représentant le poids d'une colonne d'air de 1 cm² de base et de hauteur égale à l'épaisseur de l'atmosphère au-dessus du point P, on conçoit aisément que la pression diminue quand on s'élève, comme la pression due à un liquide diminue quand on se rapproche de sa surface libre.

Il est assez facile de contrôler, à l'aide d'un baromètre quelconque, que cette diminution est d'environ *1 mm* de mercure quand on s'élève de *10 m au voisinage du sol.*

Mais il serait imprudent de conclure par exemple, que la pression diminue de 60 cm de mercure pour une altitude de 6 000 m. L'expérience montre en effet qu'à 6 000 m la pression atmosphérique est encore de 35 cm de mercure environ.

C'est que la variation de pression n'est pas régulière, comme dans le cas des liquides, et les variations ***ne sont pas proportionnelles*** *aux différences d'altitude.*

La compressibilité de l'air explique ce phénomène : l'air, à l'altitude zéro (niveau de la mer), comprimé par le poids des couches supérieures, possède un poids volumique *supérieur* à celui de l'air situé au sommet d'une montagne.

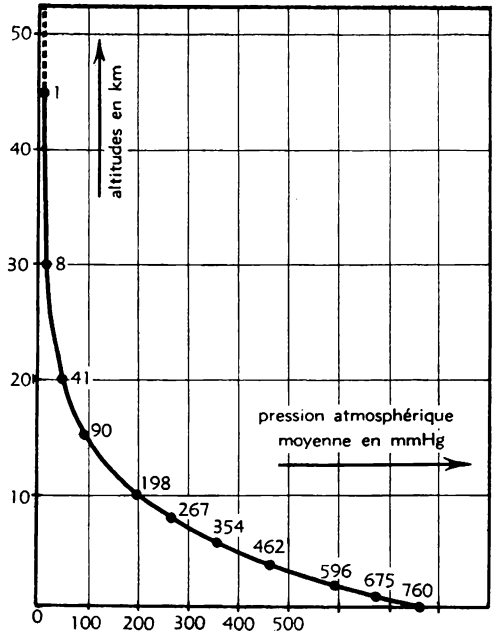


FIG. 5. — *A chaque altitude correspond une pression atmosphérique.*

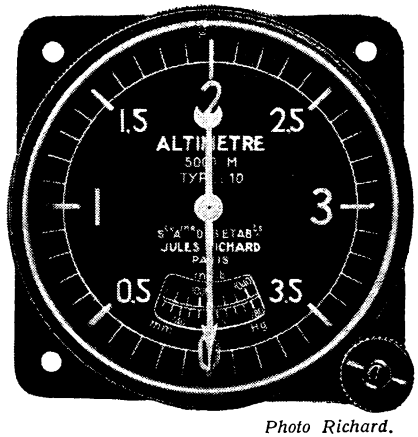


Photo Richard.

FIG. 6. — *Cadran d'un altimètre d'aviation.*

L'appareil est gradué de 0 *à* 4 000 *m* (2,5 *représente* 2 500 m). *Avant la mesure, il est nécessaire de régler l'appareil en tenant compte de la pression atmosphérique au sol; le petit cadran auxiliaire sert à ce réglage.*

On remarque que les pressions y sont indiquées en millimètres de mercure et en millibars : 780 *millimètres de mercure valent exactement* 1 040 *millibars* (*mb*).

Le calcul, confirmé par des mesures expérimentales, permet de tracer la courbe représentant les altitudes en fonction des pressions atmosphériques correspondantes (fig. 5).

On saisit tout l'intérêt de cette courbe. Si l'on veut connaître l'altitude du lieu où on se trouve, il suffira d'y mesurer la pression atmosphérique et de se reporter au graphique. Exemple : Au sommet du Mont Blanc (4 800 m.), H = 45 cm de mercure.

Les **altimètres** sont de véritables baromètres métalliques dont le cadran n'est pas gradué en centimètres de mercure, mais directement en altitudes (fig. 6). Les alpinistes et les aviateurs en font un usage courant.

Les **barographes** sont des baromètres enregisteurs gradués également *en altitudes* qui accompagnent les avions en vol. Non seulement ils peuvent donner à tout instant l'altitude réelle, mais leurs indications sont conservées sur la feuille enregistreuse.

3. **Prévision du temps.** — Dans nos régions, on a constaté qu'une ***augmentation lente*** et *continue* de la pression atmosphérique précède en général une période de *beau temps;* une ***baisse régulière*** indique l'approche du *mauvais temps;* une ***baisse*** *brusque* annonce presque toujours la *tempête* ou *l'orage.*

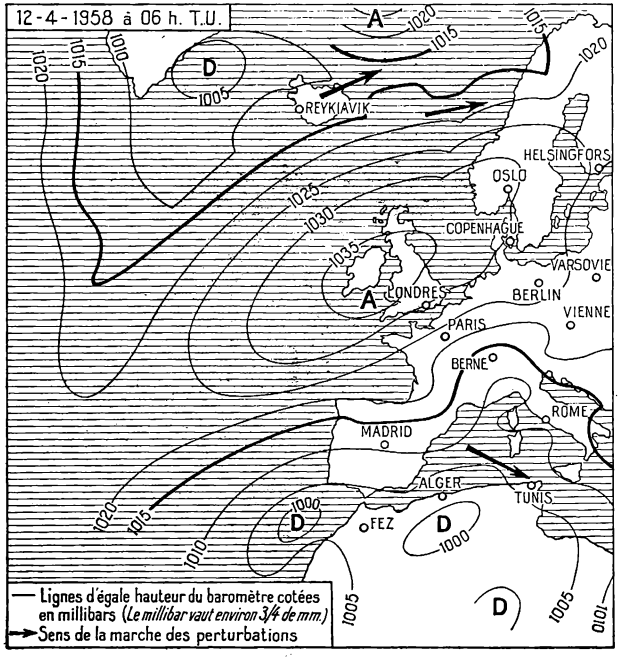


FIG. 7. — *Réseau de courbes isobares.*

Un baromètre permet donc de prévoir le temps qu'il fera, à condition de l'utiliser judicieusement, c'est-à-dire d'observer les variations de pression plusieurs heures au moins avant de risquer une prévision.

Les Bureaux de Météorologie centralisent les indications relevées au même moment en de très nombreuses stations (valeurs ramenées à l'altitude zéro, c'est-à-dire corrigées en tenant compte de l'altitude de la station). Reportant ces nombres sur des cartes, ils peuvent tracer des *courbes* réunissant tous les points « de même pression au même jour et à la même heure », qu'on nomme **courbes isobares.** La figure 7 montre un réseau de courbes isobares, où les pressions sont chiffrées en millibars.

On voit qu'au moment des observations une *zone de haute pression A* (1 035 mb) couvre l'Irlande et une partie de l'Angleterre. Elle s'intercale entre des régions *D* de pression plus basse (Sud du Groënland et Afrique). Si la zone *A* se déplace régulièrement, on peut, en suivant attentivement sa marche, prévoir si elle intéressera la France, à quelle date approximative et quelle sera alors la durée probable du *beau temps.*

EXERCICES

1. Chaque lecture au baromètre normal se fait avec une incertitude de 1/100 de mm. Quelle erreur absolue en résulte-t-il sur la mesure de la pression atmosphérique : en centimètres de mercure? en millibars?

Quelle est l'erreur relative de cette mesure?

Rép. : 0,002 cm de mercure : 0,026 mb; $\frac{1}{38\,000}$.

2. Un baromètre à mercure est constitué par un tube de diamètre intérieur 5 mm plongeant dans une cuve dont la section, au niveau du mercure, est 30 cm². On constate que le mercure baisse de 2 cm dans le tube. Quelle est, en millibars, la variation de la pression atmosphérique?

Rép. : 26 mb.

3. Un baromètre marque une pression de 75 cm de mercure au niveau du sol. Quelle est son indication au sommet d'un immeuble haut de 6 étages de 3,5 m? Rép. : 74,8 cm.

4. Quelle est la pression moyenne à Chamonix (Altitude : 1 000 m) en admettant que l'air conserve le même poids volumique jusqu'à cette altitude. La valeur réelle est-elle supérieure ou inférieure au nombre calculé?

Rép. : 66,5 cm de mercure; supérieure.

5. Qu'arriverait-il si la boîte d'un baromètre métallique présentait une fuite? Si elle n'était pas absolument vide d'air? (la pression d'un gaz dans un récipient clos augmente quand la température s'élève).

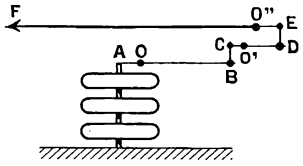


FIG. 8.

6. Le système amplificateur d'un baromètre enregistreur est représenté sur la figure 8.

O, O', O" sont des pivots fixes.

A B C D E sont des articulations mobiles.

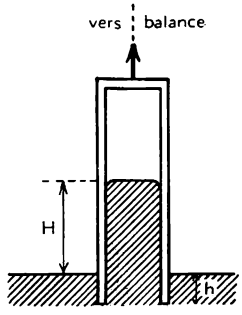
OA = 2 cm; OB = 8 cm; O'C = 1 cm;
O'D = 3 cm; O"E = 3 cm; O"F = 21 cm.

Quel est le déplacement de l'extrémité F de l'aiguille si A se déplace de 1/10 de mm?

7. Pour améliorer la fidélité des baromètres métalliques, ne peut-on pas remplacer la force élastique des ressorts par une force de pesanteur? Faire le schéma d'un appareil enregistreur de ce type.

PROBLÈMES

1. Un tube barométrique en verre, cylindrique, de longueur totale 1 mètre, de section intérieure $s = 1\ cm^2$ et de section extérieure $S = 1{,}5\ cm^2$, dont le fond est plan et horizontal, est accroché verticalement sous le



plateau d'une balance (fig.). Pour le maintenir immobile il faut lui appliquer une force verticale $\vec{F}$. — On constate alors que le tube plonge dans le mercure d'une large cuvette d'une hauteur $h = 2\ cm$, et que le mercure s'élève dans le tube de $H = 75\ cm$. On donne : Poids du tube de verre vide P : 130 gf. Poids volumique du mercure $\varpi = 13{,}6$ gf/cm³.

1° Exprimer l'intensité de la force F en fonction de P, s, S, h, ϖ.

2° Calculer la valeur numérique de F.

3° Montrer que les variations de la pression atmosphérique se traduisent par des variations proportionnelles de F, si on maintient le tube en position invariable. Quelle est la variation de la pression atmosphérique (en millibars) qui correspondrait à la sensibilité de la balance : un centigramme?

2. Les deux branches cylindriques, verticales, A et B d'un tube en U, contenant du mercure, ont respectivement comme sections : $s = 1\ cm^2$ et $S = 100\ cm^2$. La partie supérieure de A est fermée et constitue une chambre barométrique vide d'air. Sur le mercure de B flotte un disque lesté, pesant 680 gf, qui s'enfonce de 1 cm dans le mercure, son axe étant vertical.

1° La pression atmosphérique subissant une variation Δh, on cherche à maintenir au même niveau horizontal la face supérieure du disque en agissant sur lui avec une force verticale, orientée vers le bas; cette force est égale à 34 gf. Quelle est la variation de la pression atmosphérique :

a) en millimètres de mercure?

b) en millibars?

2° Aurait-on avantage, pour déceler, par ce procédé, de très faibles variations de la pression atmosphérique, à augmenter le diamètre du disque? Si le disque présentait une section horizontale de 90 cm², à quelle variation de pression correspondrait une masse de 1 g ajoutée ou retranchée sur sa face supérieure pour maintenir sa position invariable? Une telle sensibilité ne paraît-elle pas illusoire? Donner quelques raisons.

3° Revenant au montage de la première partie, on se propose, *sans faire agir aucune force sur le disque*, de transformer le baromètre en appareil enregistreur. Indiquer, par un schéma simple, tracé à une échelle convenable, un dispositif pour lequel 1 mm d'ordonnée sur la feuille enregistreuse traduit une variation de 1 mm de mercure de la pression atmosphérique.

LECTURE

Pascal et l'horreur du vide.

« La Nature a horreur du vide », disaient les anciens Physiciens, qui pensaient ainsi expliquer l'ascension des liquides dans les tubes vidés d'air.

L'expérience de Torricelli suggère à Pascal, alors âgé de vingt-quatre ans, que cette « horreur » est limitée puisque le mercure ne monte pas à une hauteur supérieure à 76 cm environ.

« ...J'ai peine à croire que la nature, qui n'est point animée ni sensible, soit susceptible d'horreur et j'incline bien plus à imputer tous ces effets à la pesanteur et pression de l'air... »

Pascal décide en 1647 de contrôler l'existence de la pesanteur de l'air. Ne pouvant faire lui-même l'expérience projetée, il charge son beau-frère Périer, habitant l'Auvergne, de l'exécuter. Voici en quels termes Pascal précise à Périer la façon de mener à bien l'expérience :

« J'en ai imaginé une (expérience) qui pourra seule suffire pour nous donner la lumière que nous cherchons, si elle peut être exécutée avec justesse. C'est de faire l'expérience ordinaire du vide plusieurs fois en même jour, dans un même tuyau, avec le même vif-argent (le mercure), tantôt en bas, et tantôt au sommet d'une montagne élevée pour le moins de 500 ou 600 toises, pour éprouver si la hauteur du vif-argent suspendu dans le tuyau se trouvera pareille ou différente dans ces deux situations. Vous voyez déjà, sans doute, que cette expérience est décisive de la question, et que, s'il arrive que la hauteur du vif-argent soit moindre au haut qu'au bas de la montagne (comme j'ai beaucoup de raisons de le croire, quoique tous ceux qui ont médité sur cette matière soient contraires à ce sentiment), il s'ensuivra nécessairement que la pesanteur et pression de l'air est la seule cause de cette suspension du vif-argent, et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est bien certain qu'il y a beaucoup plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne, que non pas sur son sommet. »

C'est alors la célèbre expérience du Puy de Dôme (19 décembre 1648) où Périer, transportant un tube de Torricelli au sommet de la montagne, montre que le mercure ne s'élève pas aussi haut que dans la plaine. Périer rend compte de ses observations dans une lettre historique, modèle d'exactitude documentaire...

Pascal conclut alors :

« Cette expérience ayant découvert que l'eau s'élève dans les pompes à des hauteurs toutes différentes, suivant la variété des lieux et des temps, et qu'elle est toujours proportionnée à la pesanteur de l'air, elle acheva de donner la connaissance parfaite de ces effets; elle termina tous les doutes; elle montra quelle en est la véritable cause; elle fit voir que l'horreur du vide ne l'est pas; et enfin elle fournit toutes les lumières qu'on peut désirer sur ce sujet.

Qu'on rende raison maintenant, s'il est possible, autrement que par la pesanteur de l'air, pourquoi les pompes aspirantes élèvent l'eau plus bas d'un quart sur le Puy de Dôme en Auvergne qu'à Dieppe.

Pourquoi un même siphon élève l'eau et l'attire à Dieppe, et non pas à Paris.

Pourquoi deux corps polis, appliqués l'un contre l'autre, sont plus faciles à séparer sur un clocher que dans la rue.

Pourquoi un soufflet bouché de tous côtés est plus facile à ouvrir sur le haut d'une maison que dans la cour.

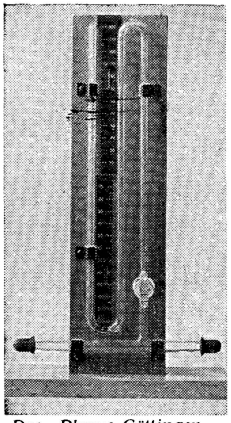
Pourquoi, quand l'air est plus chargé de vapeurs, le piston d'une seringue bouchée est plus difficile à tirer.

Enfin pourquoi tous ces faits sont toujours proportionnés au poids de l'air comme l'effet à la cause.

Est-ce que la nature abhorre plus le vide sur les montagnes que dans les vallons, quand il fait humide que quand il fait beau ? Ne le hait-elle pas également sur un clocher, que dans un grenier ou dans les cours ?

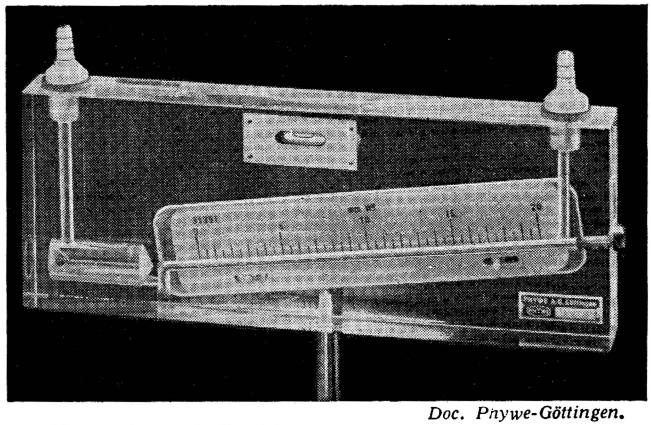
Que tous les disciples d'Aristote assemblent tout ce qu'il y a de fort dans les écrits de leur maître et de ses commentateurs, pour rendre raison de ces choses par l'horreur du vide, s'ils le peuvent : sinon qu'ils reconnaissent que les expériences sont les véritables maîtres qu'il faut suivre dans la physique; que celle qui a été faite sur les montagnes a renversé cette croyance universelle du monde, que la nature abhorre le vide, et ouvert cette connaissance qui ne saurait jamais plus périr, que la nature n'a aucune horreur pour le vide, qu'elle ne fait aucune chose pour l'éviter, et que la pesanteur de la masse de l'air est la véritable cause de tous les effets qu'on avait jusqu'ici attribués à cette cause imaginaire ».

(Traité de la pesanteur de la masse de l'air.)



Doc. Phywe-Göttingen.

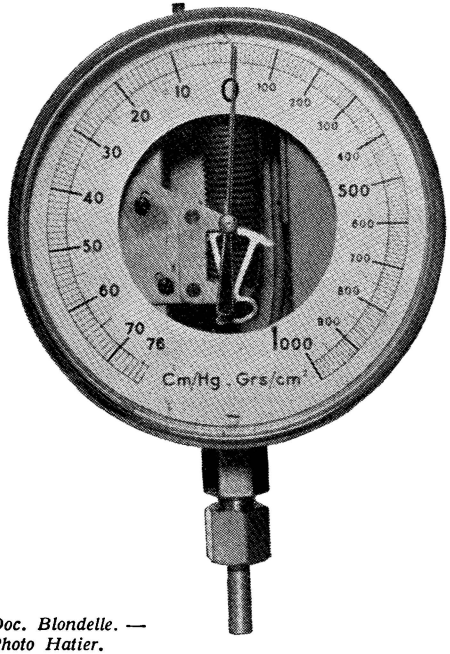
Tube en U simple.



Doc. Phywe-Göttingen.

Tube incline, à grande sensibilité.

Manomètres à liquides



Doc. Blondelle. — Photo Hatier.

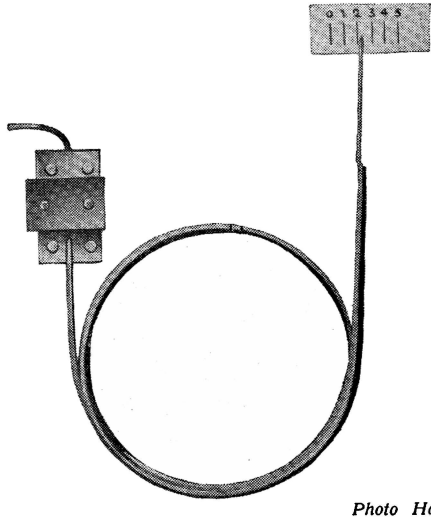


Photo Hatier

Manomètres métalliques.

A gauche : *Dans ce manomètre à soufflet le zéro correspond à la pression atmosphérique. Le demi-cadran de gauche permet la mesure des pressions résiduelles dans les récipients où l'on fait le vide; c'est une échelle des " degrés de vide " (Noter les abréviations techniques incorrectes des unités de pression).*

A droite: *Un des premiers manomètres de Bourdon : simple tube enroulé; l'extrémité sert d'index.*

18. MANOMÈTRES

1. LA PRESSION D'UN GAZ EST PRATIQUEMENT LA MÊME EN TOUS LES POINTS. — Voici une bouteille d'oxygène comprimé utilisée pour la soudure autogène (fig. 1). Elle porte l'indication de la pression du gaz : 100 *atm* [1]. Sa capacité est environ 50 *litres*. Elle contient environ 6,5 *kg* de gaz. L'oxygène comprimé a donc, dans ces conditions, comme masse volumique *moyenne :*

$$\rho \simeq \frac{6\,500}{50\,000} \simeq 0{,}13 \text{ g/cm}^3$$

et comme poids volumique *moyen :* 0,13 gf/cm³.

Entre deux points A et B de deux plans horizontaux distants de 1 mètre la différence des pressions est numériquement égale au poids d'une colonne du gaz de hauteur 100 cm et de section 1 cm² soit :

$$P_B - P_A \simeq 1 \times 100 \times 0{,}13 = 13 \text{ gf/cm}^2$$

Par rapport à la pression du point le plus bas, la variation ***relative*** de pression entre A et B est :

$$\frac{P_B - P_A}{P_B} \simeq \frac{13}{100\,000} = 1{,}3 \times 10^{-4}.$$

Même pour des points assez éloignés, on voit que ***cette variation reste très faible.*** C'est là une conséquence de l'extrême dispersion des molécules gazeuses dans le volume

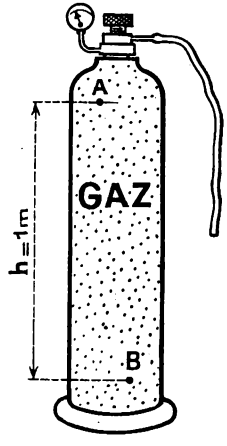


FIG. 1. — *Dans une bouteille de gaz la pression est pratiquement la même en tous les points.*

(1) Certaines pressions sont données en *hectopièzes* (*HPZ*). 1 hectopièze est à peu près égal à 1 atmosphère.

qu'elles occupent, qui entraîne le *faible poids volumique* de la matière à l'état gazeux; les molécules d'une « couche de gaz » *ne pèsent guère* sur les molécules de la couche inférieure.

Pour exprimer que la pression est pratiquement la même en tous les points du récipient, nous ne dirons pas, comme pour les liquides : la pression *en tel point*, mais plus simplement : la pression ***du gaz.*** Un appareil destiné à mesurer cette pression (manomètre) donnera des indications valables pour *tous* les points d'un même réservoir.

2. CLASSIFICATION DES MANOMÈTRES. — L'échelle des pressions est très étendue. Dans un tube producteur de rayons X la pression est de l'ordre de 1/100 de mm de mercure. Au laboratoire, on sait produire couramment des pressions atteignant 40 000 kgf/cm². Sans qu'il y ait des frontières bien définies entre les trois domaines suivants, on peut distinguer :

a) **Les pressions voisines de la pression atmosphérique :** elles règnent dans les canalisations d'air comprimé, les bouteilles d'eaux gazeuses, les chambres à air des pneumatiques, les ampoules des lampes à incandescence.

b) **Les faibles pressions :** pressions résiduelles dans les récipients où l'on a « *fait le vide* ».

c) **Les pressions élevées,** exercées par les gaz comprimés sur les parois des bouteilles métalliques, dans les chaudières des machines à vapeur, dans les récipients où se produisent certaines réactions de l'Industrie Chimique.

Un seul type d'appareil ne saurait convenir à la mesure de pressions aussi différentes. Aussi peut-on grouper les manomètres en quelques catégories.

3. MANOMÈTRES A LIQUIDES. — Ces appareils conviennent pour mesurer des pressions de l'ordre de la pression atmosphérique.

a) **Manomètre barométrique** (fig. 2). — Très voisin du tube de Torricelli, il n'en diffère que par la cuvette qui est *fermée* et forme une **boîte** qu'on met en relation avec le gaz à étudier. La pression du gaz est équilibrée par une hauteur de mercure égale à *h*.

Dans le cas où *h* est faible le tube peut être court et avoir la forme d'un U (mesure de la pression d'un gaz dans un récipient qu'on est en train de vider (fig. 3).

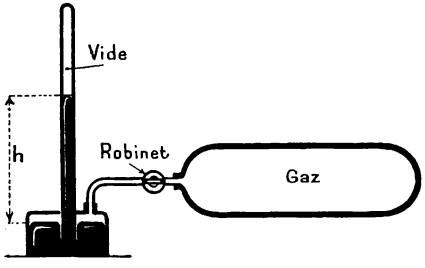


FIG. 2. — *Manomètre barométrique.*

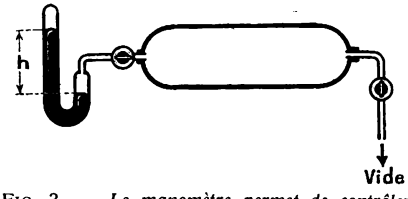


FIG. 3. — *Le manomètre permet de contrôler la pression dans le récipient qu'on est en train de vider.*

b) **Manomètre à air libre** (fig. 4). — Le tube T est ouvert à son extrémité supérieure; le mercure y supporte donc la pression atmosphérique H. La pression du gaz est donc :

$$p = H \pm h.$$

selon que le niveau B dans la branche ouverte est supérieur ou inférieur au niveau A. Dans le cas de la figure :

$$p = H - h.$$

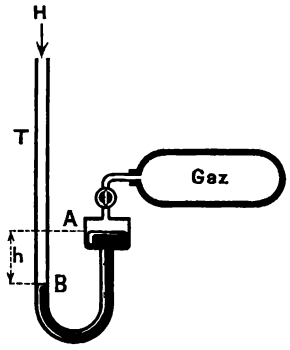


FIG. 4.

Cas particuliers. — On prévoit que l'emploi de ce type d'appareil est limité pour les pressions élevées par l'encombrement que présenterait le tube T, et pour les basses pressions par la difficulté de mesurer facilement, avec une précision convenable, une hauteur de quelques millimètres de mercure par exemple. CAILLETET [1] put cependant réaliser un manomètre à air libre dont le tube ouvert avait pour support la Tour Eiffel et qui, rempli de mercure sur une hauteur de 300 m, permettait de mesurer des pressions jusqu'à 400 atmosphères. D'autre part, on sait que la hauteur *h* d'un liquide qui équilibre une pression donnée est *inversement proportionnelle au poids volumique du liquide.* En remplaçant le mercure par de l'*eau,* chaque hauteur *h* est *multipliée par* 13,6. Amenons l'extrémité d'un tuyau de gaz d'éclairage dans un verre d'eau (fig. 5). Le gaz s'échappera en bulles jusqu'à ce que l'orifice atteigne une certaine profondeur *h.* Nous avons là un véritable manomètre à *air libre;* la hauteur *h,* de quelques centimètres d'eau, indique l'*excès* de la pression du gaz dans la canalisation sur la pression atmosphérique. Avec le mercure, la dénivellation serait seulement de quelques millimètres.

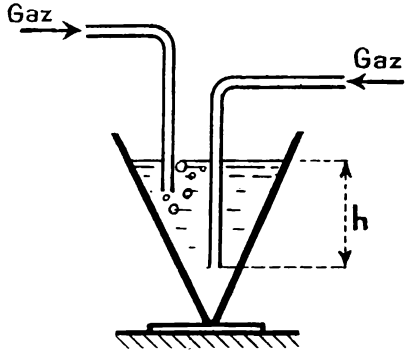


FIG. 5.

Pour augmenter la sensibilité d'un manomètre à air libre, on utilise quelquefois l'artifice du *tube incliné* (fig. 6). Si, par exemple, la pression du gaz entraîne une ascension *h* dans le tube incliné, la lecture se fait sur la longueur AB *beaucoup plus grande,* et l'erreur relative de la mesure est plus faible. (V. page 202 un modèle de laboratoire).

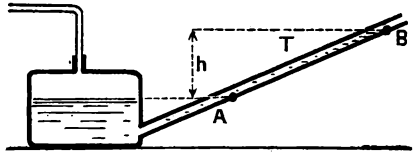
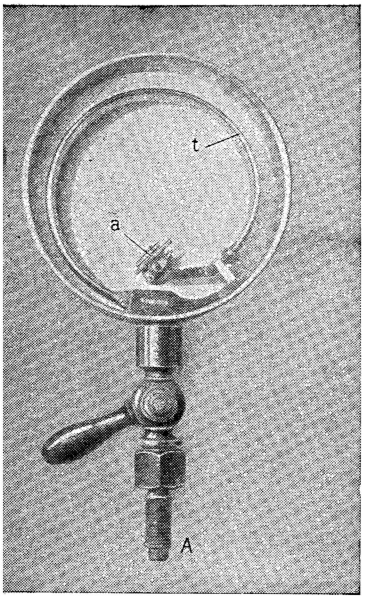


FIG. 6. — *Manomètre à air libre, à tube incliné.*

(1) CAILLETET (V. notices biographiques).



Dos

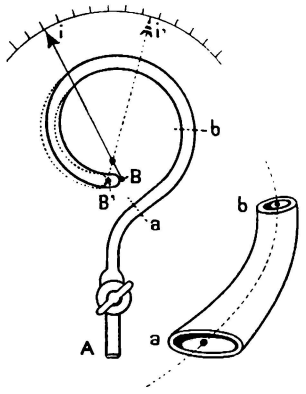
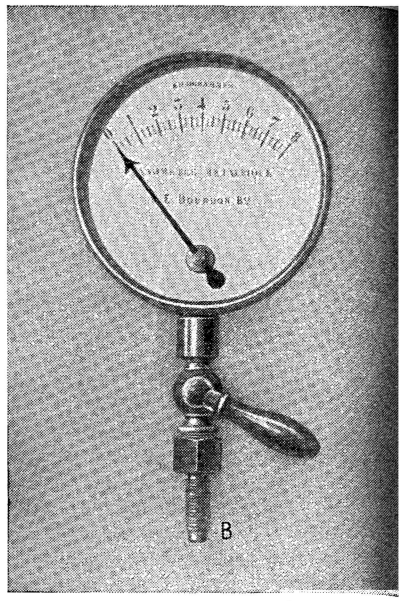


FIG. 7. — *Manomètre de Bourdon.*
A droite : coupe du tube en ***a*** *et* ***b***.



Photos Hatier.

Face

4. MANOMÈTRES MÉTALLIQUES. — Dans ces appareils on oppose aux forces créées par les pressions des gaz des forces dues à l'*élasticité des métaux :* ils se rapprochent donc par leur principe des baromètres métalliques. Le plus connu est le manomètre de BOURDON [1] (fig. 7). Un tube métallique, aplati, de *section elliptique* est enroulé en forme de point d'interrogation. Une extrémité **A** est mise en relation avec le récipient dans lequel on veut mesurer la pression. En **B**, sur l'autre extrémité, *fermée*, est articulée une *aiguille* ayant O comme pivot et dont la pointe se déplace devant un *cadran* gradué.

Quand la pression du gaz s'exerce dans le tube, celui-ci tend à se *dérouler;* **B** vient en **B'** entraînant l'index de ***i*** en ***i'***. Quand la pression atmosphérique agit seule, le dispositif reprend, par élasticité, sa position initiale.

Une réalisation moderne, à soufflet, est représentée page 202 à côté du modèle original du mécanicien BOURDON.

La graduation doit être faite par comparaison avec un appareil à liquide de l'un des types précédents (manomètres absolus).

Dans de nombreux instruments de ce genre, l'aiguille marque **zéro** quand le tube A est ouvert à l'air libre. L'indication de l'aiguille représente donc dans chaque mesure l'*excès* de la pression gazeuse sur la pression atmosphérique.

Comme pour le baromètre métallique, il est facile de transformer l'appareil en ***manomètre enregistreur*** par l'adjonction d'un tambour et d'une plume permettant l'inscription graphique.

---

(1) BOURDON (V. notice biographique).

5. QUALITÉS ET DÉFAUTS DES MANOMÈTRES. USAGES. — Les **manomètres à liquides** sont, par construction, *justes* et *fidèles*. La *sensibilité*, dépendant du poids volumique du liquide employé et de l'inclinaison du tube sur lequel s'effectuent les lectures, peut facilement *être augmentée*. Mais ce sont des appareill *fragiles, encombrants, assez peu commodes;* ils ont surtout servi aux recherches de **laboratoire**

Les **manomètres métalliques** sont *robustes et peu encombrants*, mais la valeur de leurs indications dépend du *soin* apporté à leur étalonnage et de leur *fidélité;* celle-ci est parfois défectueuse, car nous savons que les propriétés élastiques des métaux sont loin d'être invariables. Il serait donc illusoire d'augmenter beaucoup leur sensibilité en amplifiant les déplacements de l'aiguille, par des dispositifs convenables.

Leurs grand intérêt est de permettre la mesure commode, rapide et suffisamment précise de pressions faibles ou élevées, allant de quelques millimètres de mercure à quelques centaines de kgf/cm². Ce sont les manomètres **industriels.**

Remarque : *Mesures des forces par les pressions créées.* — Nous avons signalé (chap. 2 § 5). que la mesure des forces de très grande intensité pouvait se faire *indirectement* par les pressions qu'elles sont susceptibles de créer. La force F agit sur un piston de surface S qui comprime un liquide (huile) dans un corps de pompe (fig. 8). La pression $p = \frac{F}{S}$ est transmise *intégralement* par l'huile au tube d'un manomètre métallique dont les indications sont ainsi proportionnelles à F. L'appareil est étalonné avec des forces connues et le cadran est gradué en *unités de force*. On réalise ainsi un ***dynamomètre,*** dont l'emploi tend à se généraliser (fig. 9).

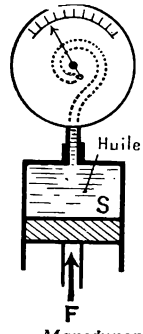
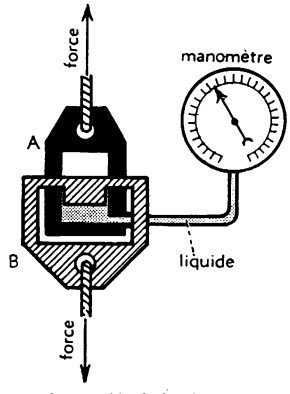
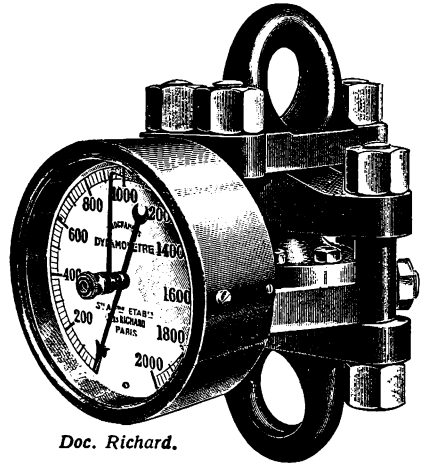


FIG. 8. — *Manodynamomètre.*

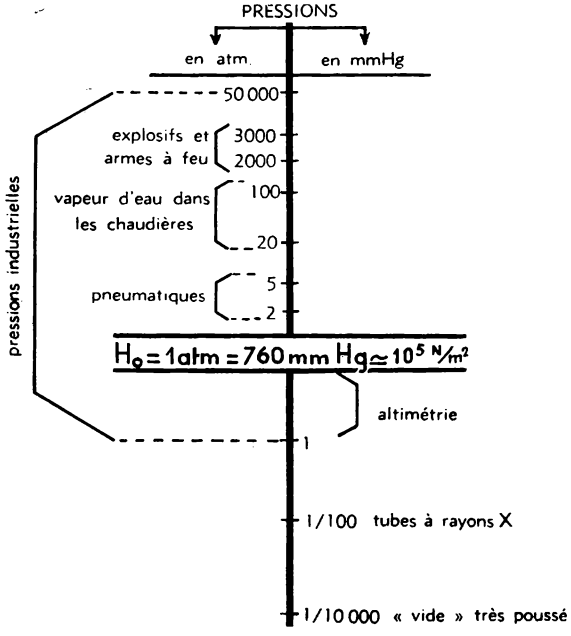




Doc. Richard.

FIG. 9. — *Un étrier* A *porte une* cuvette *dans laquelle s'enfonce un* piston *porté par l'étrier* B. *Sous le piston se trouve comprimé un* liquide *qui actionne le déplacement de l'aiguille d'un manomètre. Le cadran est directement gradué en* **forces.**

6. ÉCHELLE DES PRESSIONS DES GAZ. — Le tableau suivant résume quelques valeurs des pressions fréquemment rencontrées dans l'industrie et les laboratoires. La très grande étendue de l'échelle des pressions gazeuses ne permet évidemment pas une représentation par des segments proportionnels aux différentes valeurs citées.



EXERCICES

1. Quelle devrait être la hauteur du tube d'un manomètre à air libre à mercure pour qu'il puisse servir à des mesures jusqu'à 15 kgf/cm²?

Rép. : 10,64 m.

2. Aux niveaux *a* et *b* du tube de sûreté d'un appareil de chimie contenant de l'eau (fig. 10), les rayons intérieurs sont respectivement 2 mm et 1 cm. La pression du gaz dans l'appareil vient à augmenter de 10 cm d'eau. Quels sont les déplacements de *a*, de *b*? Rép. : *a* : 9,62 cm; *b* : 0,38 cm.

3. Que faut-il comprendre quand on dit : la pression du gaz d'éclairage est 8 cm d'eau? Quelle est la pression réelle, en millimètres de mercure?

4. La branche inclinée d'un manomètre à eau fait un angle de 30° avec l'horizontale.

En admettant que chaque lecture puisse se faire à 1 mm près, quelle est, en centimètres de mercure, la variation de pression qui correspond à un déplacement de 10 cm de l'index liquide?

Avec quelle erreur absolue est-elle mesurée?

Rép. : 0,37 cm de mercure à 0,007 cm près.

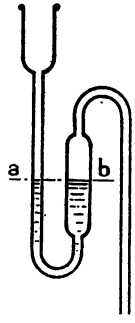


FIG. 10.

5. Dans un appareil producteur d'hydrogène, le niveau de l'acide dans le tube à entonnoir est à 20 cm au-dessus du niveau de l'acide dans le flacon. Quelle est, en centimètres de mercure, la pression du gaz dans l'appareil? (Densité de l'acide : 1,1; pression atmosphérique : 76 cm de mercure.)

Rép. : 77,6 cm.

6. Dans le manomètre représenté par la figure 11, les deux faces s et S du piston P ont comme diamètres 1 cm et 12 cm. Le piston est équilibré par une hauteur $h = 20$ cm de mercure. Quelle pression x faut-il faire agir sur la face s pour que la dénivellation h devienne égale à 172 cm?

Rép. : $x = 288$ atm.

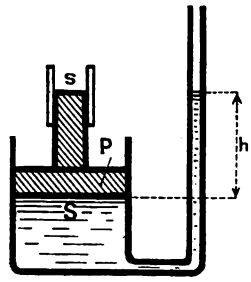
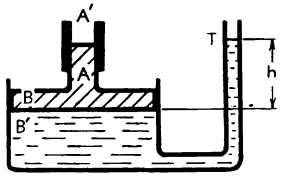


FIG. 11.

PROBLÈMES

1. Un manomètre est construit comme l'indique la figure : deux pistons A et B, solidaires l'un de l'autre, pénètrent dans deux cylindres verticaux A' et B'. Section de A : 4 cm²; section de B : 400 cm². Le cylindre B' est plein d'eau et communique avec un tube T vertical ouvert à sa partie supérieure; section de T : 3 cm².



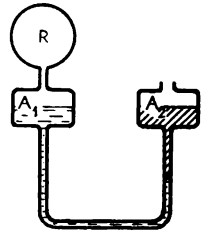
1° A' communique avec l'air, comme T. On note une dénivellation $h = 10$ *cm d'eau*. Quel est le poids total des deux pistons?

2° Sur A on exerce une pression x; la dénivellation h augmente de 20 cm. Calculer x.

3° Laissant agir sur A la pression x, on ajoute sur B une masse de 1 kilogramme. Quelle est la nouvelle valeur de h? De combien s'est abaissé le piston B?

Toutes les pressions seront évaluées en N/m². On prendra comme valeur de la pression atmosphérique 10^5N/m².

2. Un tube en U de section intérieure $s = 1$ *cm²* est terminé par deux cuvettes A_1 et A_2 de même section $S = 100$ *cm²*. A_1 communique avec un gaz contenu dans un récipient R; A_2 est ouverte à l'air libre. A_2 contient de l'huile de densité 0,8, A_1 contient de l'eau. Les deux surfaces libres des liquides sont sur un même plan horizontal et la surface commune huile-eau est à 40 cm au-dessous de ce plan, dans la branche du tube en U située au-dessous de A_2. Pression atmosphérique : 760 mmHg. Dans tout le problème on évaluera les pressions en *centimètres d'eau*.



1° Quelle est la pression P du gaz?

2° Cette pression devient P' ce qui provoque une montée de 10 cm de la surface de séparation huile-eau. Calculer P'.

3° Quelle aurait été la dénivellation observée pour la même variation $P' - P$ si le récipient R avait été raccordé simplement à un manomètre à eau ordinaire? Montrez l'avantage du dispositif utilisé plus haut.

4° En désignant par S la section des cuvettes, par s la section du tube en U, par ϖ_1 le poids volumique du liquide L_1 occupant A_1 par ϖ_2 celui du liquide L_2 (non miscible avec L_1) mis en A_2, exprimer le déplacement Δx de la surface commune aux deux liquides quand la pression du gaz en A_1 augmente de ΔP. Comment faut-il choisir S, s, ϖ_1, ϖ_2, pour réaliser un manomètre sensible?

CHALEUR

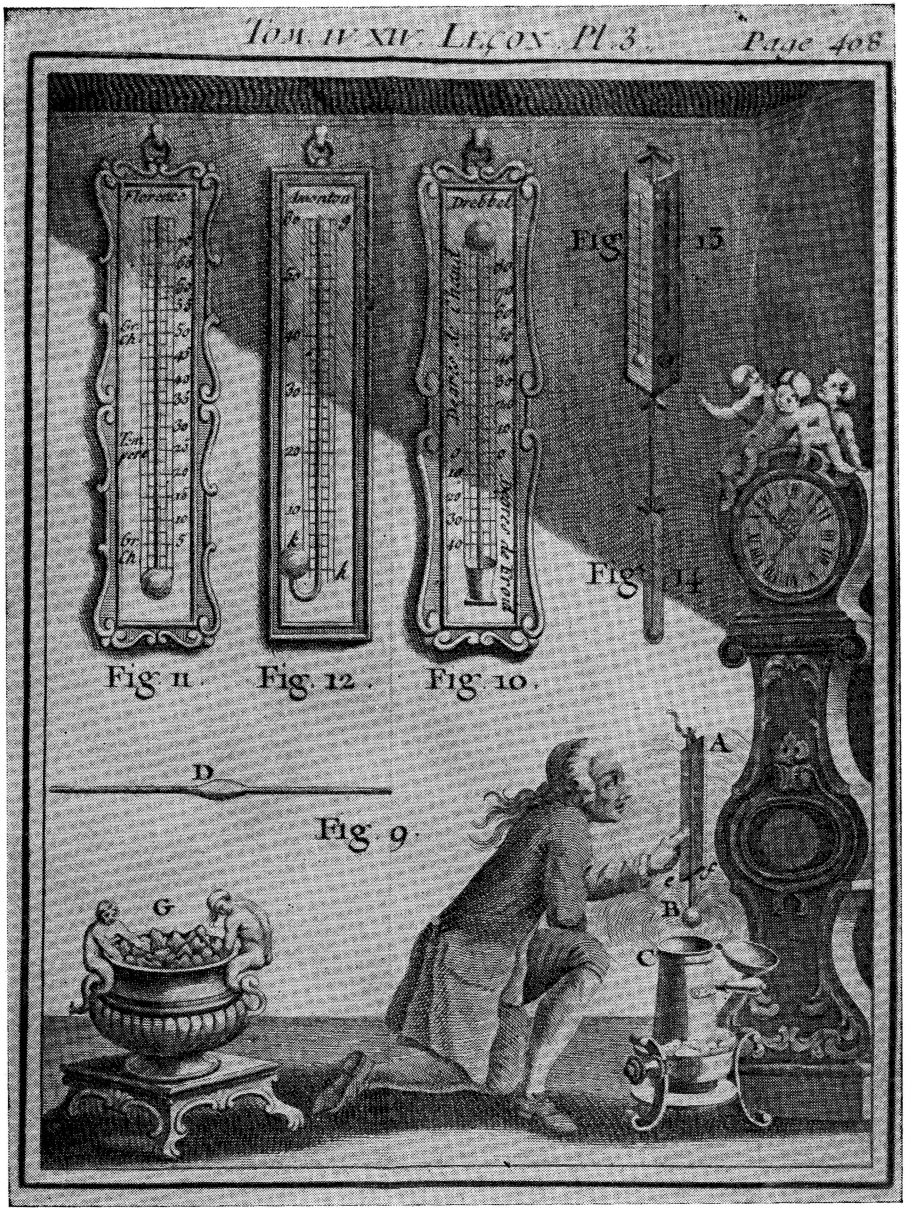


Photo Hatier.

Une page des ***Leçons de Physique expérimentale*** *de l'***Abbé Nollet** (1781).

Les figures 10, 11, 12, 13, 14 *montrent différents thermomètres, appareils fort encombrants à cette époque. La figure* 9 *résume deux opérations (analogues à la détermination actuelle des deux points fixes) qui permettent à l'opérateur de comparer la dilatation des liquides en vue de choisir le plus favorable* **« pour marquer les degrés de chaleur ou de froid ».** ***G*** *: réservoir à glace fondante.* ***C*** *: bouilloire dans laquelle va être plongé le thermomètre* ***AB.***

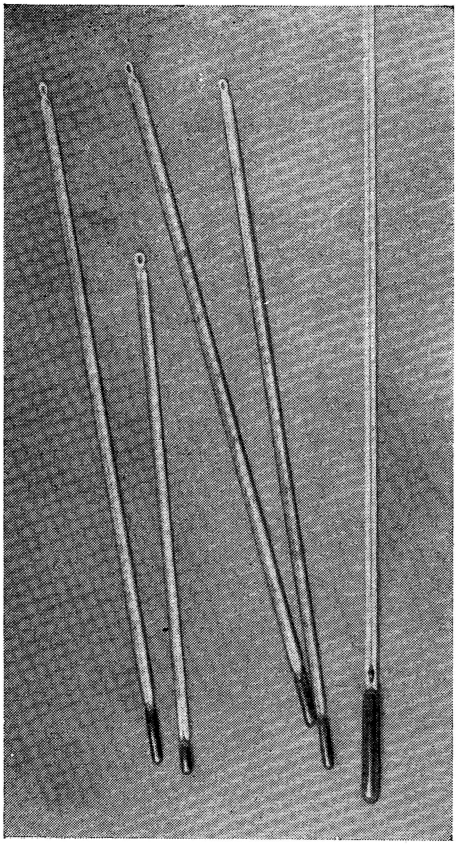


Photo Hatier.

FIG. 1. — *Quelques thermomètres utilisés au laboratoire.*

19. TEMPÉRATURE THERMOMÈTRE

A. NOTION DE TEMPÉRATURE

1. SENSATION DE LA TEMPÉRATURE. — Comme la notion de force, la notion de **température** est inséparable de certaines *impressions* reçues par les organes des sens. Nous disons que la **température** d'un corps s'*élève* quand on le *chauffe*, et au contraire que sa **température** s'*abaisse* quand on le *refroidit*, le corps conservant toujours le même état physique.

Grâce au *toucher*, il est possible de classer grossièrement par températures croissantes des corps chauds et froids, mais cette détermination ne comporte aucune précision.

Elle manque de sensibilité : l'eau bouillante, le charbon au rouge, un morceau de métal fortement chauffé ne peuvent être *classés;* ils donnent seulement une douloureuse sensation de brûlure.

Elle manque de fidélité : une eau tiède paraît chaude, si la main qui la touche vient d'être plongée dans l'eau froide, et froide si la main vient d'être plongée dans l'eau chaude.

2. CHOIX D'UN PHÉNOMÈNE LIÉ A LA TEMPÉRATURE. — Pour établir des *degrés de chaud ou de froid*, il faut renoncer à des indications aussi imparfaites que celles du sens du toucher. Il est préférable de se fier à un phénomène physique aussi simple que possible, au cours duquel une grandeur facile à repérer ou à mesurer suivra, dans ses variations, les variations de ce que nous désignons par *température*. Les indications devront présenter les garanties habituelles

a) de *justesse*, qui exigent des définitions rigoureuses;

b) de *sensibilité;* le classement précis des températures voisines en dépend;

c) de *fidélité :* des expériences identiques doivent fournir des indications identiques.

On peut relier la température à quelques grandeurs physiques. Citons en particulier :

des grandeurs *géométriques :* longueur, volume, surface...
une grandeur *mécanique :* pression;
une grandeur *optique :* couleur;
une grandeur *électrique :* intensité d'un courant.

Le plus souvent on s'adresse aux **dilatations,** c'est-à-dire aux changements de *dimensions* que présentent les corps chauffés ou refroidis.

***1.* Dilatation des solides.** — On sait qu'un courant électrique traversant un fil métallique l'échauffe. Tendons un fil de cuivre entre deux points A et B (fig. 2, *a*). Quand un courant électrique le parcourt, le fil s'incurve (fig. 2, *b*); sa longueur augmente. La longueur d'un fil ou d'une tige solide est donc une *fonction croissante de sa température.*

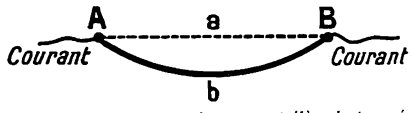


FIG. 2. — *Le passage du courant élève la température du fil; il se dilate.*

Malheureusement, cette dilatation présente deux défauts importants : *a*) Elle est *peu sensible :* une barre de fer de 1 m passant de l'air ambiant dans l'eau bouillante s'allonge de moins de 1,2 mm. *b*) Elle est *peu fidèle :* fortement chauffé, le fil revenant ensuite à sa température initiale ne reprend pas exactement sa longueur initiale.

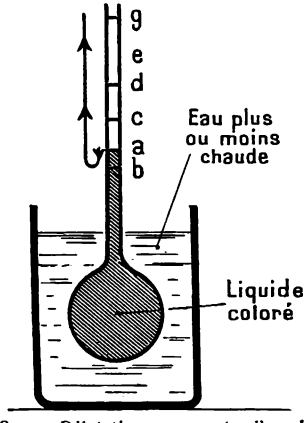


FIG. 3. — *Dilatation apparente d'un liquide.*

***2.* Dilatation des liquides.** — Prenons un ballon de verre surmonté d'un tube vertical étroit (fig. 3) et rempli *complètement* d'un liquide coloré, froid, jusqu'au niveau *a*. Plongeons-le dans un récipient d'eau chaude et observons le niveau d'affleurement primitivement en *a* :

1° Il *commence par baisser légèrement* de *a* en *b*.

2° Il *s'élève* ensuite régulièrement en *c*, *d*,... etc.

3° Il *se fixe* finalement en *g*.

Interprétons

La descente de *a* en *b* qui paraît anormale s'explique aisément : le verre du ballon recevant le premier la chaleur transmise par le bain se dilate *un peu avant* le liquide coloré, dont le niveau descend. Puis ballon et liquide continuent de se dilater en même temps et l'ascension de *b* en *c* indique que le liquide se dilate *beaucoup plus* que le verre.

Enfin, quand l'affleurement atteint *g*, le liquide ne se dilate plus; c'est qu'il ne reçoit plus de chaleur de l'eau du récipient.

Cette expérience traduit un fait général : placés dans les mêmes conditions, *les liquides se dilatent beaucoup plus que les solides.* Sans doute leur dilatation ne peut-elle être étudiée qu'à travers les récipients qui les contiennent et la dilatation inévitable du récipient vient-elle compliquer les observations; on n'observe en somme qu'une dilatation *apparente.* Mais comme les liquides se dilatent, en moyenne, environ 30 fois plus que les solides qui les contiennent, l'inconvénient n'est pas trop grand.

La dilatation apparente d'un liquide est un phénomène *assez fidèle, assez sensible* pour être utilisé à l'étude de la température.

***3.* Dilatation des gaz à pression constante.** — Les gaz étant très compressibles, conservons donc la pression constante et soumettons un gaz à une variation de température.

Pour cela, enfermons une certaine quantité de gaz (air) dans un ballon muni d'un tube fin horizontal dans lequel une goutte de mercure servira de bouchon mobile (fig. 4).

Chauffons légèrement l'air en enveloppant simplement le ballon des deux mains; l'index de mercure se déplace aussitôt rapidement sur une assez grande longueur, la pression du gaz restant constamment égale à la pression atmosphérique.

Ramené aux conditions initiales, l'air reprend son volume primitif. La dilatation d'un gaz à pression constante est donc :

très sensible,

fidèle.

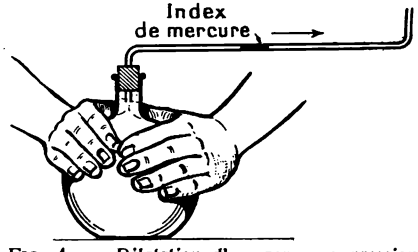


FIG. 4. — *Dilatation d'un gaz sous pression constante.*

Il semble donc que ce soit là le phénomène idéal pour suivre les variations de la température. Effectivement, c'est bien aux gaz qu'on s'adresse pour réaliser des appareils de haute précision dans certains laboratoires (1). Mais ces instruments seraient d'un encombrement beaucoup trop grand et d'un maniement trop difficile pour les opérations habituelles; on préfère utiliser les liquides.

---

(1) Un appareil, appelé *thermomètre normal*, servant d'étalon, esti nstallé au Bureau International des Poids et Mesures. Dans cet instrument, les variations de la température sont reliées aux variations de la *pression* d'un gaz (hydrogène) enfermé dans un récipient de volume invariable.

Voici un fait d'importance capitale : *dans l'impossibilité ou nous sommes d'évaluer avec précision la température d'un corps en interprétant directement les impressions de nos sens, nous conviendrons de dire que les* ***variations apparentes du volume d'un liquide****, dans une enveloppe de verre, représentent les* ***variations de température****. Nous venons de faire le choix d'un* ***phénomène thermométrique.***

B. ÉCHELLE CENTÉSIMALE DE TEMPÉRATURE

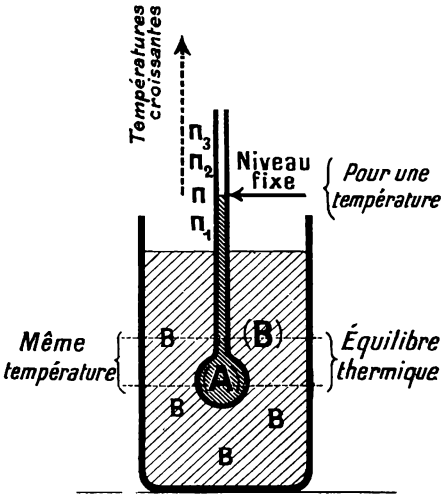


FIG. 5.

3. ÉQUILIBRE THERMIQUE. — Reprenons l'expérience de la figure 3 quand le niveau du liquide coloré s'est fixé au repère invariable *g*. A partir de cet instant on peut dire que le milieu extérieur (l'eau chaude du récipient) n'a plus d'influence sur le volume apparent du liquide coloré contenu dans l'ampoule (fig. 5).

Nous conviendrons de dire que les corps ***(A)*** *et* ***(B)*** *sont en* ***équilibre thermique,*** *ou qu'ils sont à des* ***températures égales.***

Cette convention permet de classer les températures de deux milieux quelconques (*C*) *et* (*C'*). Le liquide (*A*) dans son enveloppe jouant le rôle d'un *indicateur*, on notera le niveau ***n*** dans le tube quand l'équilibre thermique de (*A*) *et* (*C*) sera réalisé, puis le niveau ***n'*** pour l'équilibre (*A*) (*C'*). Si ***n*** et ***n'*** sont identiques (*C*) *et* (*C'*) sont à la *même* température. Sinon, on fait correspondre au plus élevé des niveaux la température la plus élevée; (*C*) est à une température *plus élevée* que celle de (*C'*) quand ***n*** est au-dessus de ***n'***.

4. POINTS FIXES ET ÉCHELLE CENTÉSIMALE. — L'*indicateur*, mis successivement en équilibre thermique avec de nombreux corps plus ou moins chauds peut être muni de nombreux *niveaux-repères* n_1, n_2, n_3... permettant des comparaisons. L'ensemble des repères est une ***échelle de températures.***

Pour réaliser une échelle commode, facile à reproduire sur tous les appareils indicateurs, on opère ainsi :

1° On choisit seulement deux **repères fondamentaux,** obtenus au cours d'équilibres thermiques absolument reproductibles et dont la fidélité peut être rigoureusement et souvent contrôlée; ces repères sont les ***points fixes*** de l'échelle, notés, par exemple **X** et **Y** sur la tige de l'indicateur.

2° On divise l'intervalle **XY** en *100 parties égales;* chacune de ces parties porte le nom de ***degré (°).***

3° On nomme *point zéro (0°)* le repère **X** correspondant à la température la plus basse et *point cent (100°)* le repère **Y** correspondant à la température la plus élevée.

La graduation obtenue est dite ***échelle centésimale.***

5. CHOIX DES POINTS FIXES : ÉCHELLE CELSIUS.

a) Point zéro. — Plongeons entièrement l'indicateur dans un seau de glace fondante (glace en train de fondre, au contact de l'eau liquide qu'elle produit). Pendant toute la durée de la fusion le niveau du liquide coloré reste *fixe* (fig. 6). La température de la glace fondante est invariable; nous la prendrons comme *point zéro.*

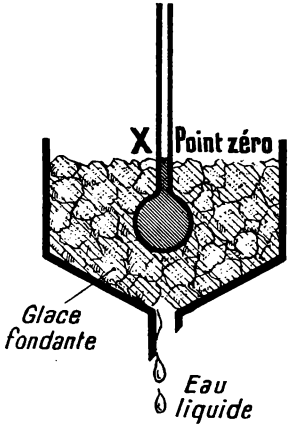


FIG. 6. — *Les points fixes.*

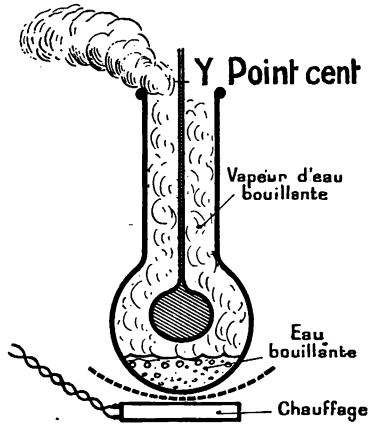


FIG. 7.

b) Point cent. — Plongeons maintenant l'indicateur dans un bain de vapeur très près de la surface de l'eau bouillante (eau en train de bouillir sous une pression atmosphérique *constante*) (fig. 7). Pendant toute la durée de l'ébullition, le niveau du liquide reste fixe en **Y.** La température de la vapeur d'eau bouillante sous la pression atmosphérique *normale* est invariable; nous l'adopterons comme *point cent.*

L'échelle centésimale qui prend comme points fixes fondamentaux les deux équilibres thermiques précédents est appelée échelle CELSIUS [1]. Les températures y sont évaluées en *degrés Celsius* (°C). Le nom d'*échelle Celsius* remplace, depuis 1948, l'ancienne dénomination *échelle centésimale* qui avait succédé à *échelle centrigrade.*

Remarques. — Insistons sur la nature particulière d'une échelle de température :

a) On peut seulement ***repérer*** *une température.* C'est arbitrairement que nous avons numéroté *zéro* le trait X. La température *zéro* n'a donc pas la signification de : température *nulle.* Le signe zéro n'est qu'une convention commode de langage; notre échelle n'est qu'une échelle de repérage.

b) On peut ***mesurer une variation*** *de température.* Entre les degrés 10° et 20° de l'échelle, il y a une différence de température égale au double de la différence de température comprise entre 10° et 15°. On peut ainsi définir une *différence* de température égale au double, au triple... d'une autre ou égale à la somme de plusieurs autres. Une variation de température est donc une grandeur mesurable. Un degré Celsius représente une variation de température comme

(1) CELSIUS (V. notice biographique).

le degré d'un escalier représente une variation d'altitude. Une variation de température se *mesure* en degrés.

c) Autres échelles. — On a utilisé jadis l'échelle RÉAUMUR [1] qui indiquait 0° dans la glace fondante et 80° dans l'eau bouillante. L'échelle FAHRENHEIT encore utilisée aujourd'hui dans les pays anglo-saxons marque *32* dans la glace fondante et *212* dans la vapeur d'eau bouillante. Ces deux échelles ne sont donc pas centésimales.

Nous verrons plus tard qu'une autre échelle est très employée pour les usages scientifiques : ***l'échelle absolue.*** C'est une échelle centésimale dans laquelle la température de la glace fondante est repérée par *273 °A* (°A est l'abréviation de *degré absolu*) et celle de la vapeur d'eau bouillante sous pression atmosphérique normale par *373 °A*. Ces nombres seront justifiés au chapitre 22.

d) Extension de l'échelle Celsius vers les hautes et basses températures. — La dilatation ou la contraction d'un liquide dans une enveloppe de verre ne peut servir à repérer des températures qu'entre certaines limites, même si on décide de prolonger la graduation, sur la tige de l'indicateur, en dehors de l'intervalle compris entre les points fixes.

Pour les températures très hautes ou très basses, on est amené à abandonner le phénomène thermométrique que nous avons choisi. La température est alors rattachée à des grandeurs *mécaniques, électriques, optiques.* Cela nécessite de nouvelles conventions, choisies de manière que, dans un intervalle commun, les appareils, basés sur des lois différentes, donnent pour la température des indications *concordantes.*

C. THERMOMÈTRE A MERCURE

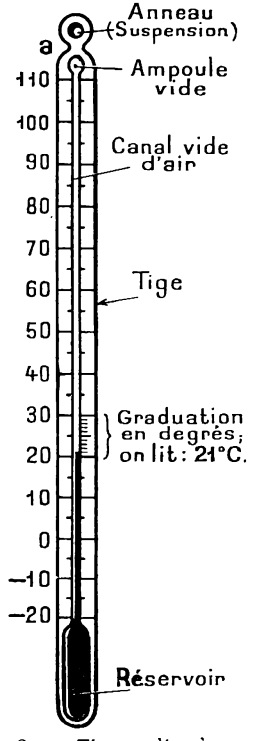


FIG. 8. — *Thermomètre à mercure.*

Le **thermomètre à mercure** est basé sur la *dilatation apparente du mercure dans une enveloppe de verre.*

6. DESCRIPTION (fig. 8). — Un **réservoir** en *verre mince* contient environ 1/2 à 1 cm³ de mercure. Au réservoir est soudée une **tige** en *verre épais*, percée d'un **canal** *très étroit*, parfaitement *cylindrique* (diamètre de quelques dixièmes de mm) dans lequel peut s'élever le mercure.

Lors de la construction, on remplit le réservoir de mercure, puis on le chauffe à la température la plus élevée $\mathbf{t}_m$ que doit indiquer le thermomètre; le mercure occupe alors toute la longueur de la tige jusqu'en **a.** On ferme le canal en ce point par soudure, en ménageant souvent une *petite ampoule* vide d'air. Si, par accident, le thermomètre était ensuite porté à une température supérieure à $\mathbf{t}_m$, le mercure occuperait l'ampoule sans risquer, en se dilatant, de briser l'enveloppe.

---

1) RÉAUMUR (V. notice biographique).

Par refroidissement, le mercure regagne le réservoir, laissant derrière lui le canal vide d'air. La tige porte une **graduation** de *traits équidistants*.

7. GRADUATION. — Il faut déterminer les deux points fixes : Zéro et Cent et diviser l'intervalle en 100 degrés centésimaux. On opère dans l'ordre suivant.

1° **Point Cent.** — Le thermomètre est presque entièrement plongé dans une enceinte remplie de vapeur d'eau bouillante en utilisant l'appareil représenté sur la figure 9.

Une petite chaudière contient de l'eau pure portée à l'ébullition. La vapeur s'échappe en suivant le trajet des flèches par une **double cheminée** formée de deux tubes concentriques. Le réservoir et la tige du thermomètre sont donc entourés d'une double couche de vapeur. Le mercure s'élève alors jusqu'à un niveau fixe α qui est noté sur le verre.

Le point α correspondrait au point 100 de l'échelle centésimale si la pression de la vapeur d'eau bouillante était à la *pression atmosphérique normale*, ce qui n'est pas tout à fait exact. Un petit **manomètre** *m* à air libre, contenant de l'eau, montre en effet que la pression dans la cheminée centrale est *légèrement supérieure* à la pression atmosphérique du moment. On note la dénivellation *h*, et, lisant la pression atmosphérique H au baromètre, on en déduit la pression effective $H + h$ à laquelle se produit l'ébullition. On fait alors une légère correction qui fournit la position exacte du point 100. On grave 100 sur la tige en ce point.

2° **Point Zéro.** — Quand le point 100 a été déterminé, on porte le thermomètre dans la glace fondante. Pour cela, on fait un mélange de glace pilée en menus fragments et d'eau pure, et on y plonge le réservoir et la partie inférieure de la tige (fig. 10). Le mercure se fixe au niveau β ; c'est le point *zéro*. Nous verrons

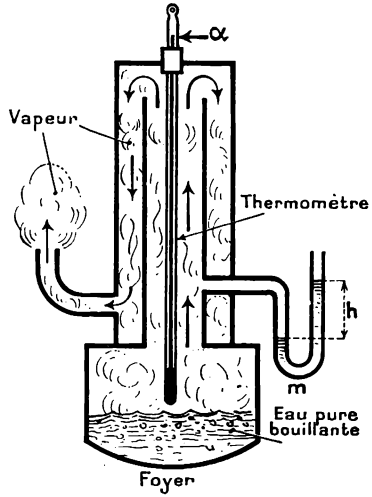


FIG. 9. — *Point cent (détermination pratique).*

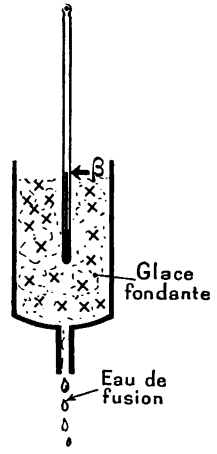


FIG. 10. — *Point zéro (détermination pratique.*

que les variations de la pression atmosphérique ont une influence absolument négligeable sur ce point fixe.

3° **Graduation.** — Il ne reste plus qu'à **graduer la tige.** Le thermomètre est porté sur une **machine à diviser** qui effectue automatiquement et avec une incomparable précision le tracé des 100 degrés égaux. On prolonge en général la graduation au-delà de cent (degrés 101, 102, etc.) et au-delà de zéro (degrés — 1, — 2, — 3, etc.).

8. QUALITÉS DU THERMOMÈTRE A MERCURE. — *a*) **Choix du mercure.** — Nous verrons que, parmi les liquides, le mercure est celui qui se dilate le moins. C'est là une circonstance nettement défavorable à son utilisation comme liquide thermométrique. Il a été choisi cependant pour certaines raisons :

1° On sait l'obtenir *très pur.*

2° *Très bon conducteur de la chaleur,* il se met très rapidement en équilibre thermique avec le milieu dont il doit indiquer la température.

3° *Il ne mouille pas le verre* comme la plupart des liquides. Par conséquent, pendant son refroidissement, la totalité du mercure reflue vers le réservoir. Aucune gouttelette ne reste dans le canal du thermomètre.

4° Même fortement chauffé, *il émet peu de vapeur.*

5° Il reste liquide dans un *intervalle de température très étendu* (— 39° à + 350°) comprenant les températures usuelles.

b) **Justesse. Comparaison des thermomètres.** — Si, par construction, les points 0 et 100 ont été correctement déterminés, tous les thermomètres sont *justes pour ces deux points.* Mais pour toutes les autres températures, deux thermomètres en équilibre thermique dans le même milieu n'indiquent jamais rigoureusement le même nombre de degrés. De plus, en dehors des points 0 et 100, leurs indications ne concordent pas avec celle du thermomètre *étalon* à hydrogène. Cela tient à des irrégularités de dilatation des différentes enveloppes. L'écart ne dépasse cependant jamais quelques dixièmes de degré.

c) **Fidélité : déplacement du zéro.** — Prenons un thermomètre gradué depuis longtemps et plongeons-le dans la glace fondante; nous observons que le mercure ne se fixe pas exactement au trait zéro, mais très souvent au-dessus, par exemple à + 0°,25. Nous dirons qu'il y a un ***déplacement du zéro*** de 1/4 de degré.

Quelle est la cause de cette anomalie?

Lors de la graduation, quand on a pris le point 100, l'enveloppe et son contenu étaient dilatés. Mais, pendant le refroidissement de 100° à 0°, alors que le mercure a pris le volume correspondant à cette dernière température, le verre conserve un *résidu de dilatation,* qu'il n'abandonnera qu'après un temps très long (plusieurs mois, ou même plusieurs années). Au moment où on a gravé le point zéro, le volume

du réservoir était donc légèrement *trop grand*. Par la suite, quand le résidu de dilatation disparaît peu à peu, le mercure s'*élève lentement* dans la tige.

De plus, à cause de la dilatation et de la contraction irrégulières du verre, un thermomètre à mercure, en service normal, n'a pas de « zéro » rigoureusement fixe; il est ***peu fidèle.***

Ce défaut n'est pas très grave. Si on connaît le déplacement du zéro, il est facile d'en tenir compte pour corriger les indications. Ainsi, pour l'appareil qui nous a servi d'exemple on dira :

Température lue : 32°,75.
Température corrigée : 32°,50.

On choisit souvent, pour construire les thermomètres modernes, des verres « durs » qui, se dilatant très peu, assurent une bonne fidélité aux appareils [1].

Remarque. — Devant ce manque de fidélité du thermomètre à mercure, et étant donnée la manière souvent imprévisible dont se comportent les verres lors de leur dilatation et de leur contraction, on comprend pourquoi on a choisi pour définir l'échelle centésimale *légale* la variation de pression d'un gaz (hydrogène) enfermé dans une enveloppe de *platine* dont la dilatation est beaucoup plus régulière et dont les résidus de dilatation sont pratiquement négligeables. Le thermomètre normal à hydrogène est un appareil *fidèle.*

d) **Sensibilité** — Nous apprendrons que la dilatation des corps est proportionnelle au volume qui subit l'élévation de température. D'autre part, pour une augmentation donnée de son volume, le niveau du mercure se déplacera dans la tige d'une longueur inversement proportionnelle à la section de celle-ci. Pour obtenir un thermomètre sensible, il faudra donc donner :

au réservoir,
une assez grande capacité;
à la tige,
un diamètre intérieur très faible.

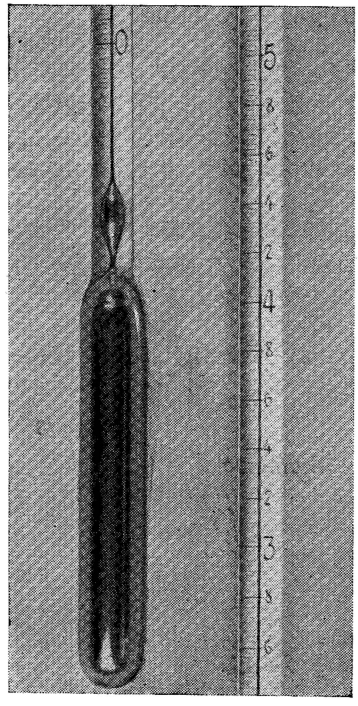


FIG. 11. — *Réservoir et portion de la tige d'un thermomètre à mercure à grande sensibilité (grandeur naturelle). L'intervalle entre deux traits fins correspond à* $\frac{1}{50}$ *de degré.*

(1) Le déplacement du zéro entraîne une erreur dans le repérage d'une température; par contre, il n'empêche pas la détermination précise d'une *variation* de température.

On voit que, théoriquement, rien ne s'oppose à la réalisation de thermomètres ultra-sensibles.

Diverses considérations limitent cependant la sensibilité.

1° Une masse trop importante de mercure contenue dans le réservoir se met *trop lentement* en équilibre thermique avec le milieu où elle se trouve.

2° Un canal trop fin provoque des *ruptures* de la colonne mercurielle pendant le refroidissement.

3° Surtout, il est très rare qu'on ait à repérer avec une extrême précision (au 1/1 000 de degré près par exemple) une grandeur physique comme la température qui risque le plus souvent, d'un instant à l'autre, de subir des variations fortuites beaucoup plus grandes.

9. USAGE DU THERMOMÈTRE A MERCURE. — Nous rassemblons ici quelques précautions indispensables pour un bon emploi des thermomètres courants de laboratoire, en particulier pendant les séances de *Travaux Pratiques.*

1. CONNAITRE LE DÉPLACEMENT DU ZÉRO. C'est nécessaire si on veut repérer une température à 0,2 degré près. Certains thermomètres anciens accusent un déplacement du zéro de l'ordre du degré. C'est par contre inutile si on veut seulement mesurer une variation de température.

2. RÉALISER UN BON ÉQUILIBRE THERMIQUE entre le thermomètre et le milieu dont on veut connaître la température. Il ne faut pas oublier que le meilleur thermomètre n'indique « *que sa propre température* ».

a) Cas des liquides. — On doit amener tous les points du liquide à la même température. Pour cela il faut (c'est *très important*) l'***agiter*** régulièrement, pendant les lectures ou entre deux lectures consécutives du thermomètre, pour favoriser le mélange des parties chaudes et des parties froides. Le thermomètre ne doit pas être installé avec son réservoir trop près de la surface. Autant que possible on doit faire en sorte que la colonne de mercure soit presque entièrement plongée dans le liquide, sinon la colonne émergeante *a'b'* (fig. 12) échappe à l'influence de la température du bain. — Si le liquide est chauffé, il faut également éviter que le thermomètre reçoive directement de la chaleur venue du foyer.

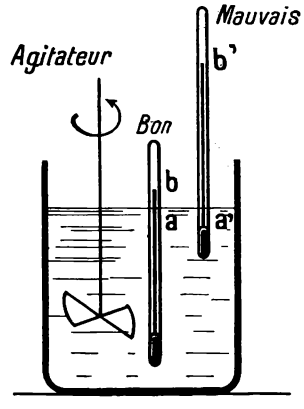


FIG. 12.

b) Cas des gaz. — Les précautions précédentes doivent être observées. Pour prendre la température de l'air ambiant, les Météorologistes se placent loin d'un mur pour éviter les réverbérations, à l'ombre, au Nord, et font tourner vivement le thermomètre au bout d'une ficelle (*thermomètre fronde*) avant de faire la lecture.

Au laboratoire on peut avoir à connaître la température d'une colonne gazeuse d'une certaine hauteur : quelques décimètres. Or, les mouvements des molécules gazeuses étant aisés, on observe assez rapidement une sorte de « triage », le gaz étant plus chaud à la partie supérieure. Pour obtenir une température *moyenne* il est bon de confronter les indications de *deux thermomètres au moins* (fig. 13).

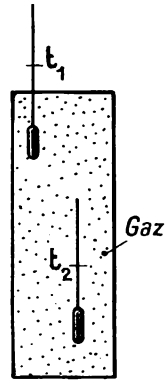


FIG. 13.

c) Cas des solides. — L'opération est plus délicate. Le contact est toujours insuffisant à moins que le solide ne soit réduit en poudre. Un solide compact doit être placé, avec le thermomètre, dans un bain ou une enceinte imperméable à la chaleur (fig. 14). L'équilibre thermique n'est réalisé que lentement. Il ne faut pas hésiter à suivre la marche du niveau de mercure longtemps avant d'effectuer la lecture quand on le juge stabilisé.

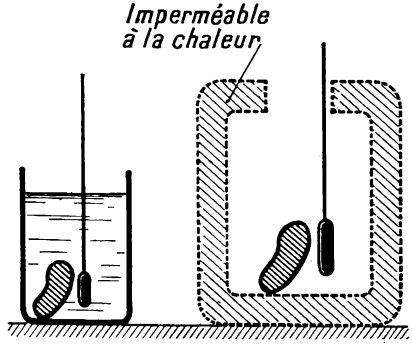


FIG. 14.

Rappelons, à l'aide de la figure 15, comment on doit placer l'œil pour effectuer une lecture du thermomètre en éliminant l'*erreur de parallaxe* et indiquons pour terminer qu'il serait ridicule de porter tout son soin à évaluer le dixième de degré si l'on commettait, par inattention, une erreur sur le nombre de degrés!

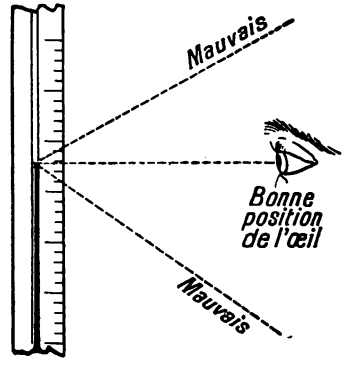


FIG. 15. — *Lecture d'un thermomètre.*

D. AUTRES THERMOMÈTRES USUELS

10. — Le thermomètre à mercure, instrument classique, n'est pas le seul à permettre la détermination des températures. Dans la vie courante l'intervalle des températures à parcourir pour un même genre de mesure est généralement peu étendu et on peut utiliser d'autres liquides; de plus il est commode, parfois, que les appareils soient *enregistreurs.* Par contre, dans les laboratoires ou les usines, on doit explorer des domaines pour lequel le thermomètre à mercure n'est pas fait; souvent les mesures exigent une précision qu'il ne permet pas. Décrivons sommairement quelques thermomètres pratiques.

11. THERMOMÈTRE MÉDICAL. — C'est un thermomètre à mercure construit pour servir au voisinage de + 37° C, température normale du corps humain. La tige est graduée en 1/10 de degré. Le canal porte un **étranglement** (fig. 16) qui, brisant la colonne mercurielle, empêche le mercure chassé par dilatation de revenir naturellement dans le réservoir pendant le refroidissement. La colonne s'immobilise donc dans la position correspondant à la plus haute température enregistrée. C'est un thermomètre *à maximum.* Quelques secousses sont nécessaires pour ramener le mercure dans le réservoir.

12. THERMOMÈTRE A ALCOOL. — Le mercure se solidifiant à — 39° ne peut servir de liquide thermométrique au-dessous de — 35° environ. En employant l'alcool (coloré en rouge), on peut repérer des températures beaucoup plus basses (— 70°). Les thermomètres à alcool sont gradués par comparaison avec un thermomètre à mercure jusqu'à + 50° environ.

D'autres liquides permettent d'atteindre des températures très basses : *toluène* (jusqu'à — 90 °C environ); *pentane* (jusqu'à — 220 °C environ).

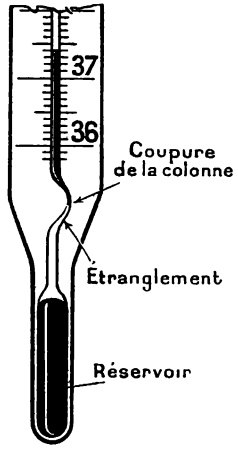


FIG. 16. — *Partie inférieure d'un thermomètre médical.*

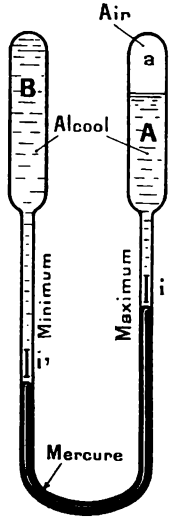


FIG. 17. *Thermomètre à maxima et minima.*

13. THERMOMÈTRE A MAXIMA ET MINIMA. — Ce thermomètre comprend **deux réservoirs** *A* et *B* reliés par un **canal** cylindrique étroit (fig. 17). *B* contient de l'alcool, *A* de l'alcool surmonté d'un certain volume **d'air;** le canal est occupé sur une certaine longueur par du mercure qui joue le rôle de piston interposé entre *A* et *B.* Quand la température s'élève, l'alcool des réservoirs A et B se dilate, l'alcool de B pousse le piston de mercure qui provoque l'ascension d'un petit **index** *i* en *fer émaillé* frottant légèrement

dans le canal, pendant que l'air de ***a*** est comprimé. L'index *i'* reste en place (frottement).

Quand la température baisse, l'alcool de *B* se contracte, le mercure rétrograde; mais l'index *i* est retenu à sa position par les frottements. Il indique donc la **température maximum** atteinte par l'appareil.

Si la température s'abaisse suffisamment, le mercure rejoint l'index *i'* et l'entraîne à son tour en haut vers une position qu'il atteint quand la température atteint son ***minimum*** et qu'il conserve quand l'appareil s'échauffe de nouveau.

Les deux branches du tube en U étant graduées par comparaison avec un thermomètre à mercure, l'index *i* indique la température *maximum* et *i'* la température *minimum* enregistrées depuis la mise en service de l'appareil. Si on veut connaître ces températures extrêmes pour une période donnée, il faut ramener, au début, à l'aide d'un *aimant*, les deux index au contact du mercure.

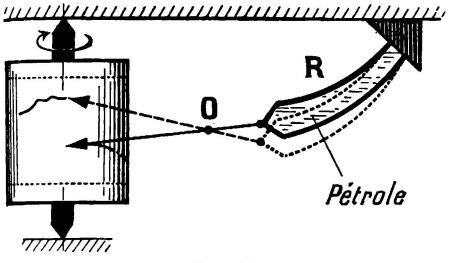


FIG. 18.
Schéma d'un thermomètre enregistreur.

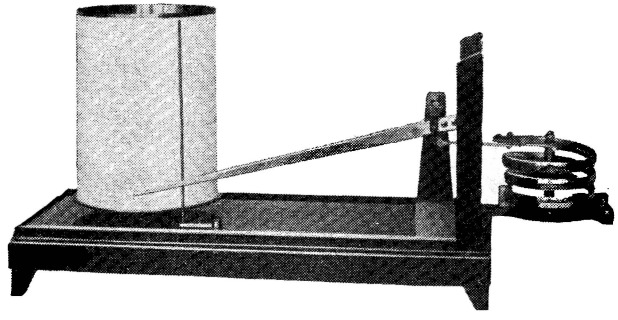


FIG. 19. — *Thermomètre enregistreur à grande sensibilité. Le tube métallique rempli de liquide est enroulé ici en hélice pour être moins encombrant.*

14. THERMOMÈTRE ENREGISTREUR. — D'un emploi courant en Météorologie, il permet d'enregistrer, en fonction du temps, la température de l'air en un lieu donné.

Il comprend une **boîte métallique** R (fig. 18) très *aplatie, incurvée,* remplie entièrement de *pétrole.* Une variation de température provoque une dilatation du liquide qui déforme légèrement la boîte. Cette déformation, convenablement amplifiée, est transmise à la pointe d'une **aiguille** qui l'inscrit sur un *cylindre enregistreur* entraîné à vitesse constante par un mouvement d'horlogerie (fig. 19).

L'appareil, gradué par une comparaison avec un thermomètre à mercure manque, à la longue, de *fidélité*; on doit alors refaire l'étalonnage.

15. THERMOMÈTRES A BILAME. — Dans ces appareils on utilise une lame formée de deux métaux (ou alliages) différents soudés sur toute leur longueur, d'où le nom.

L'effet d'une même élévation de la température n'est pas le même sur les deux substances. Le bilame se déforme et l'extrémité libre se déplace, entraînant, avec une amplification convenable la rotation d'une aiguille indicatrice. Gradués par comparaison avec un bon thermomètre à mercure, les thermomètres à bilame sont assez robustes, sensibles et peu coûteux. Leur fidélité peut être douteuse.

16. THERMOMÈTRES ÉLECTRIQUES. — Ils sont très en faveur aussi bien dans les laboratoires les plus spécialisés que dans la grande industrie.

Dans les ***thermomètres à résistance,*** un fil conducteur du courant électrique étant porté à des températures différentes, le courant est modifié et sa mesure donne une indication précise sur la température du fil.

Dans les ***thermomètres à couple,*** un circuit électrique comprend *deux soudures* entre des métaux différents. Quand les deux soudures sont à des températures différentes un courant prend naissance dans le circuit, comme si on y avait installé une pile. La mesure du courant renseigne sur la différence des températures des deux soudures. Si l'une d'elles est à une température connue (un point fixe d'une échelle de référence) on peut connaître la température de l'autre. Les thermomètres à couple sont utilisés dans l'industrie pour le domaine des *hautes températures* (v. fig. 20). Au laboratoire on profite de leur extrême sensibilité : dans certains cas on obtient le dix-millième de degré.

Signalons seulement l'existence des *thermomètres à pression* (thermomètre normal à hydrogène installé au B. I. P. M. et thermomètres industriels) et des *thermomètres optiques,* appelés souvent *pyromètres,* pour déterminer les températures très élevées, dans certains fours.

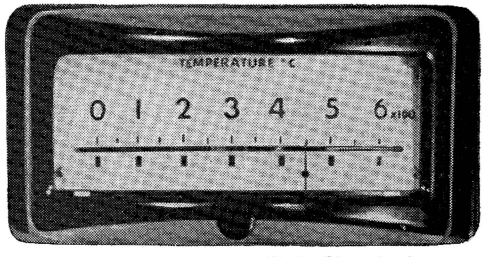


Photo Chauvin-Arnoux.

FIG. 20. — *La dilatation n'est pas le seul phénomène lié à la grandeur* **température**; *le* ***courant électrique*** *permet aussi le choix d'un phénomène thermométrique. Sur le cadran de ce thermomètre électrique industriel l'aiguille marque* + 450 °C.

17. QUELQUES TEMPÉRATURES.

— Le tableau ci-contre contient

— **A droite :** un certain nombre de repères thermométriques, dont l'ensemble a permis de fixer une ***échelle pratique internationale des températures*** (*échelle Celsius*), adoptée en 1948.

On remarquera, hors du domaine limité par les *points fondamentaux* **zéro** et **cent,** la précision très grande obtenue dans la détermination des repères importants comme :

la température d'*ébullition de l'oxygène* sous la pression atmosphérique normale;

la température d'*ébullition du soufre* sous la pression atmosphérique normale.

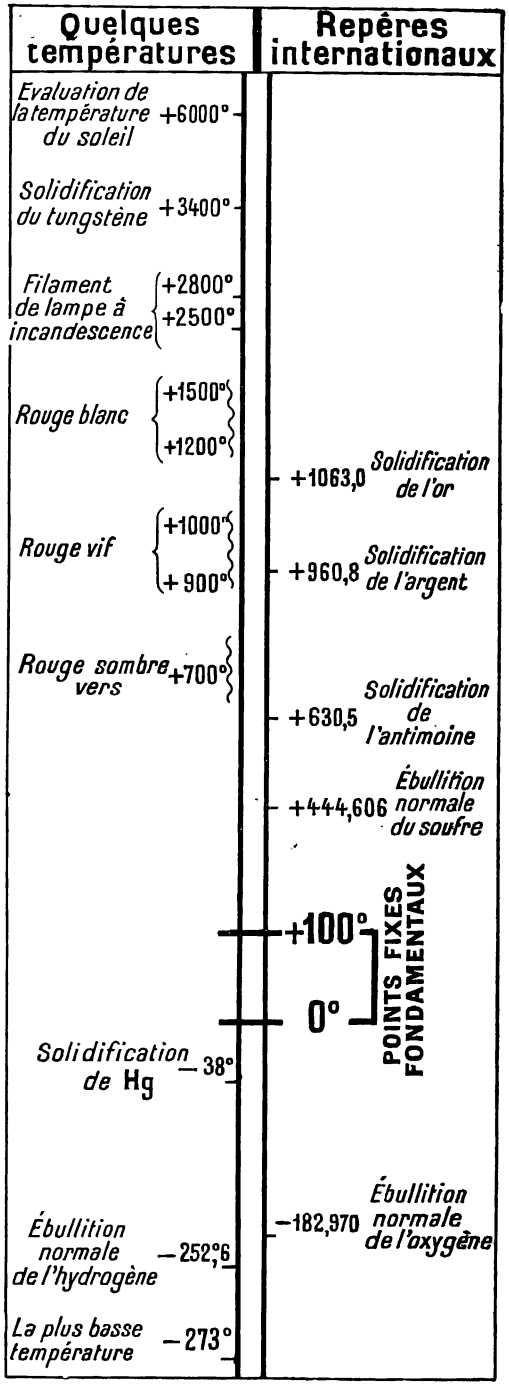
— **A gauche :** certaines températures dont il est bon de retenir seulement les ordres de grandeurs, comme :

le *rouge sombre*,
le *rouge vif*, etc.

Vers les basses températures, l'échelle ne se prolonge pas au delà de

— 273 °C.

Cette limite (zéro de l'*échelle absolue*) sera expliquée plus loin.



EXERCICES

1. Quelle est la température du corps humain (37° C) dans l'échelle Réaumur, dans l'échelle Fahrenheit? Rép. : 29,6 °C; 98,6 °C.

2. Le volume occupé par 1 degré centésimal dans le canal d'un thermomètre est $\frac{1}{6\,000}$ du volume du réservoir. Le réservoir ayant un volume de 1 cm³ et la tige un diamètre intérieur de $\frac{2}{10}$ de mm, quelle est la plus petite variation de température décelable, si on peut apprécier à 1/4 de mm près la position de l'index de mercure?

Rép. : $\frac{47}{1\,000}$ de degré.

3. On double le volume du réservoir ainsi que le diamètre du canal de la tige d'un thermomètre. Que devient la sensibilité?

Rép. : Sensibilité diminuée de moitié.

4. Quand la température s'élève de 1°, le volume apparent du mercure dans une enveloppe de verre augmente de $\frac{1}{6\,400}$ de sa valeur initiale. Un thermomètre plonge jusqu'à la division + 10 °C dans un liquide, et le mercure arrive à la division + 90 °C. Quelle est la température exacte du liquide si on admet que la colonne de mercure hors du liquide se trouve tout entière à la température moyenne de + 15 °C? Rép. : $t = 90{,}94$ °C.

5. Quelle serait la longueur de tige occupée par 1° sur un thermomètre dont le réservoir contiendrait, à 0°, 110 g de mercure et dont le canal aurait un diamètre de 1/10 de mm? Pourquoi ne construit-on pas un tel thermomètre? (Un degré occupe un volume égal à $\frac{1}{6\,400}$ du volume du réservoir.)

Rép. : 16 cm.

6. Pour quelle température centésimale les échelles Réaumur et Fahrenheit donnent-elles une indication représentée par le même numéro? Quel est ce numéro? Rép. : — 32 °C; — 25,6.

PROBLÈME

Un thermomètre à mercure pèse 38 gf dans l'air et 28 gf dans l'eau à + 4 °C. Il est construit pour fonctionner entre — 20 °C et + 130 °C. Sa tige, de longueur sensiblement égale à celle de la graduation (30 cm), est terminée par une petite ampoule de sécurité, de volume intérieur 0,02 cm³. Le volume du mercure occupant un degré sur la tige est égal à $\frac{1}{6\,000}$ du volume du réservoir.

1° Quel est le volume du réservoir?

2° Quel est le rayon du canal intérieur de la tige?

3° Quelle incertitude absolue comporte la mesure d'une variation de la température si on peut repérer la position de l'index de mercure à 1/10 mm près?

Poids volumiques à + 4 °C :

du mercure : 13,6 gf/cm³
de l'eau : 1 gf/cm³
du verre : 2,6 gf/cm³

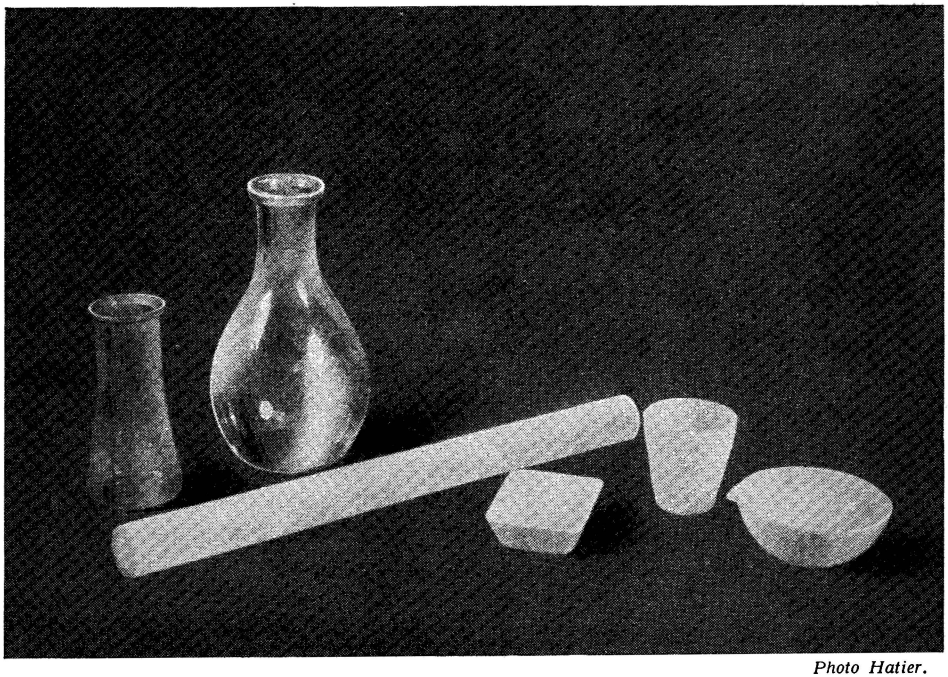


Photo Hatier.

FIG. 1. — *Vases en verre Pyrex. Tube et capsules en silice fondue. Ces objets se* ***dilatent*** *très peu à la chaleur; ils peuvent supporter sans se briser de brusques et importantes variations de température.*

20. DILATATION DES SOLIDES ET DES LIQUIDES

A. DILATATION LINÉAIRE DES SOLIDES

1. OBSERVATION. — On sait qu'un courant électrique parcourant un fil métallique l'échauffe. Tendons un fil de cuivre entre deux supports A et B (fig. 2) et repérons la position de son milieu M devant une règle graduée verticale R.

Faisons parcourir le fil par un courant; il s'incurve, le point M venant en M'. Coupons le courant et laissons refroidir le fil; il reprend sa position initiale.

Manifestement, le fil AM'B est plus long que le fil AMB : une élévation de température provoque donc un *accroissement de longueur.* On dit que le solide subit une ***dilatation linéaire.***

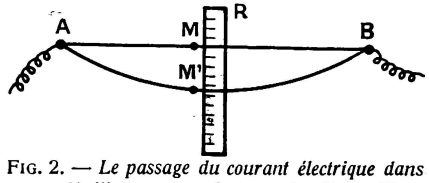


FIG. 2. — *Le passage du courant électrique dans un fil élève sa température; le fil se dilate.*

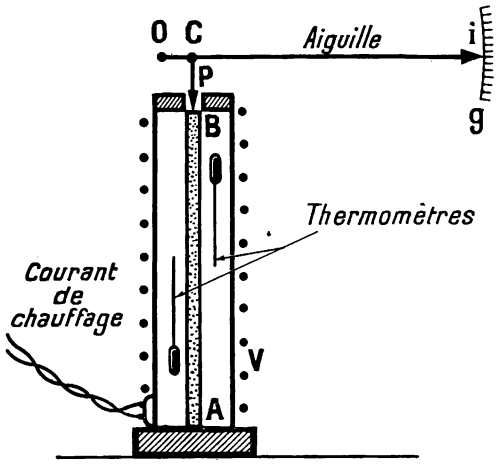


FIG. 3. — *Étude expérimentale de la dilatation. L'aiguille amplifie la dilatation linéaire de la tige AB. On peut ainsi suivre* les variations de longueur *en fonction* des variations de température.

2. EXPÉRIENCE QUANTITATIVE. — Sur un socle horizontal (fig. 3), plaçons verticalement une tige formée d'un **solide** AB, par exemple une tige d'aluminium, de longueur voisine de 50 cm. La tige est située dans l'axe d'un *manchon de verre* V entouré d'un *fil conducteur* dans lequel pourra passer un courant électrique de *chauffage*. La température moyenne de l'étuve ainsi formée est donnée par la lecture de *deux thermomètres.*

Une pointe P repose sur l'extrémité B de la tige. Elle communique ses déplacements à une *aiguille amplificatrice* articulée en C. Le déplacement du point *i* devant un cadran gradué est donc *proportionnel* à celui de B, c'est-à-dire, comme A est fixe, à la *dilatation linéaire* de la tige étudiée[1].

1. Réglons le courant électrique de manière que l'échauffement soit lent; repérons pour chaque élévation de température le déplacement de *i* et construisons le graphique correspondant (fig. 4).

Les différents points du graphique se placent sensiblement sur une **droite.** Nous pouvons conclure :

La dilatation linéaire est proportionnelle à l'élévation de température.

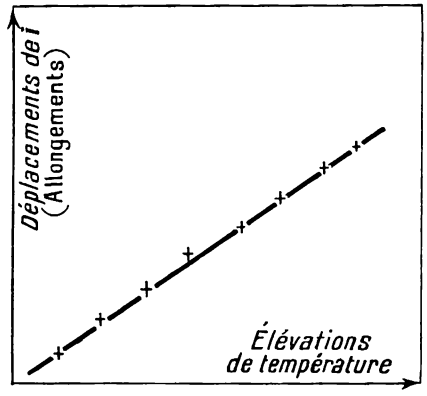


FIG. 4.

2. Supposons maintenant que la longueur AB soit non plus de 50 cm, mais de 100 cm. On peut considérer qu'une barre de 100 cm s'allongera, dans les mêmes conditions, comme deux barres de 50 cm mises bout à bout. D'où une nouvelle conclusion :

La dilatation linéaire est proportionnelle à la longueur initiale.

---

(1) L'appareil décrit n'est qu'une modification du *pyromètre à cadran*; il permet des expériences quantitatives de précision acceptable.

3. COEFFICIENT DE DILATATION LINÉAIRE. — Traduisons les résultats précédents. Soit l_0 la longueur à 0 °C, l la longueur à t °C. L'allongement total entre ces deux températures est $l - l_0$ et l'élévation de température $(t - 0)$ °C, c'est-à-dire t °C. Nous écrirons :

$$\underset{\text{dilatation}}{l - l_0} = \underset{\substack{\text{coefficient de} \\ \text{proportionnalité}}}{\lambda} \times \underset{\substack{\text{longueur} \\ \text{initiale à 0° C}}}{l_0} \times \underset{\substack{\text{élévation de} \\ \text{température}}}{t.}$$

Exprimons le coefficient λ :

$$\lambda = \frac{l - l_0}{l_0 . t}. \qquad [1]$$

Quelle est sa signification physique? En divisant l'allongement $l - l_0$ par la longueur initiale l_0 on obtient l'allongement de l'unité de longueur initiale. Ce nombre, divisé lui-même par la variation de température, donne un allongement relatif par unité de variation de température. D'où :

Définition : ***Le coefficient de dilatation linéaire d'un solide est numériquement égal à l'augmentation de longueur que subit l'unité de longueur de ce solide, pris à 0 °C, quand la température s'élève d'un degré Celsius.***
L'allongement et la longueur initiale sont mesurés avec la *même unité.*

4. BINÔME DE LA DILATATION LINÉAIRE.

La relation [1] peut s'écrire : $= l_0 + l_0 . \lambda . t$

ou encore

$$\boxed{l = l_0 (1 + \lambda . t).}$$

C'est la *formule de la dilatation linéaire*; le terme $(1 + \lambda t)$ est le ***binôme de dilatation linéaire.***

La formule de la dilatation linéaire permet de calculer la longueur à t °C d'une barre dont on connaît le cofficient λ et la longueur à 0 °C.

Exemple : *L'aluminium a pour coefficient de dilatation linéaire* : $2{,}3 \times 10^{-5}$. *Quelle est à* 100 ° *C la longueur d'une barre d'aluminium qui mesure* 1 *mètre à* 0 °C?

$$l_{100} = 100 \left(1 + \frac{2{,}3 \times 100}{10^5}\right) = \mathbf{100{,}23\ cm.}$$

5. RÉSULTATS DES MESURES DE λ. — La formule de la dilatation linéaire permet aussi de déterminer pour un solide donné le coefficient λ; il faut pour cela mesurer les grandeurs l_0, l, t. Voici quelques résultats; ils montrent que le coefficient de dilatation linéaire des solides est toujours ***très faible.***

MÉTAUX	λ	ALLIAGES	λ	AUTRES CORPS	λ
Fer.	$1{,}22 \times 10^{-5}$	Laiton (1) . .	$1{,}85 \times 10^{-5}$	Verre ordinaire. . . .	$0{,}9 \times 10^{-5}$
Cuivre . . .	$1{,}70 \times 10^{-5}$	Invar. (2)	$0{,}12 \times 10^{-5}$	Pyrex. . . .	$0{,}3 \times 10^{-5}$
Aluminium .	$2{,}33 \times 10^{-5}$	Platinite (3). .	$0{,}9 \times 10^{-5}$	Quartz. . . .	$0{,}07 \times 10^{-5}$
Zinc	$2{,}90 \times 10^{-5}$				
Platine. . .	$0{,}9 \times 10^{-5}$				

(1) Laiton : composition : Cuivre 65 % ; Zinc : 35 %.
(2) Invar. : acier au nickel à 36 % de Nickel.
(3) Platinite : acier au nickel à 46 % de Nickel.

Les métaux purs usuels ont un coefficient de dilatation linéaire de l'ordre de 2×10^{-5} ou $\frac{2}{100\,000}$.

Remarques. — 1. Les résultats indiqués ont été obtenus pour des écarts de température assez faibles au voisinage de la température ordinaire (entre 0 °C et 50 °C environ). Le coefficient λ varie légèrement quand la température varie et les valeurs indiquées ne sont que des *coefficients moyens entre* 0 °C et 50 °C. Les variations sont toutefois assez faibles pour qu'on puisse, en première approximation, ne pas en tenir compte si, pour les calculs, on ne s'écarte pas trop de cet intervalle de température.

2. Étant données la *faible valeur numérique* du coefficient λ, la *précision juste passable* avec laquelle il est connu et sa *variation* quand la température varie, on peut presque toujours, en appliquant la formule de la dilatation, se permettre une approximation très légitime : *remplacer, dans le calcul d'un allongement, au voisinage de la température t °C, la longueur l_0, (à 0 °C), qui peut-être inconnue, par la longueur l_t à t °C.*

B. DILATATION CUBIQUE DES SOLIDES

6. EXPÉRIENCE. (fig. 5).

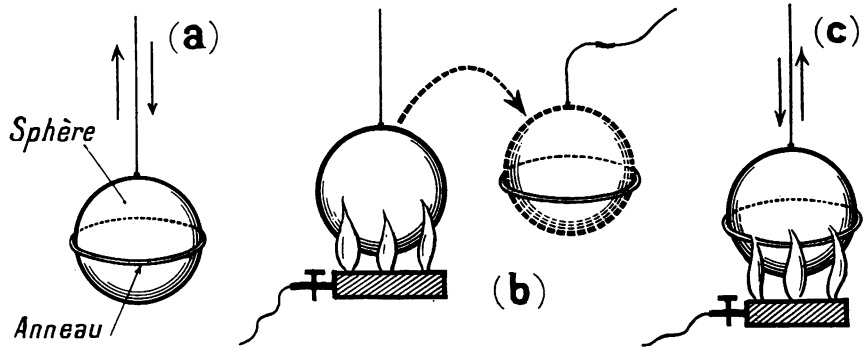


FIG. 5.

Une sphère passe très exactement dans un anneau de même métal dont le rayon intérieur est égal au rayon de la sphère à la même température ***(a)***. Chauffons la sphère *seule*; elle ne peut plus traverser l'anneau ***(b)***. Chauffons *ensemble* la sphère et l'anneau; la sphère passe exactement comme à la température ordinaire ***(c)***.

Cette expérience, dite « de l'anneau de *S' Gravesande* », vérifie quelques observations générales tirées de l'étude des dilatations :

— *Un solide se dilate dans toutes les directions;* s'il est *isotrope*[1] et si tous ses points sont portés à la même température il reste semblable à lui-même : une sphère reste une sphère; un cube reste un cube.....

— *Un corps creux* (*l'anneau*) *se dilate comme un corps plein* (*la sphère*). Une cavité se dilate comme si elle était pleine du solide qui l'entoure.

La dilatation d'un solide qui intéresse son volume est appelée ***dilatation cubique.***

7. COEFFICIENT DE DILATATION CUBIQUE.

Définition : ***Le coefficient de dilatation cubique d'un solide est numériquement égal à l'augmentation de volume que subit l'unité de volume, de ce solide, pris à 0 °C, quand la température s'élève de un degré Celsius.***

Le volume initial et l'augmentation de volume sont exprimés avec la même unité.

Si v_0 est le volume à 0 °C, v le volume à t °C, k le *coefficient de dilatation cubique,* on écrit par analogie avec la dilatation linéaire :

$$k = \frac{v - v_0}{v_0 . t}.$$

D'où :

$$\boxed{v = v_0 (1 + k.t)}$$

$(1 + kt)$ est le ***binôme de dilatation cubique.***

---

(1) *Isotrope* : qui a mêmes propriétés dans toutes les directions; c'est le cas des métaux fondus. Ce n'est pas le cas d'un cristal qui, par dilatation, ne reste pas homothétique de sa forme primitive; de même, une tige de bois ne se dilate pas de la même façon le long des fibres et tranversalement aux fibres. Le bois, les cristaux sont *anisotropes.*

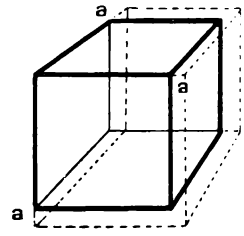


FIG. 6. — *Toutes les arêtes s'allongent de la longueur* **a**. *Le cube reste un cube.*

RELATION AVEC LE COEFFICIENT DE DILATATION LINÉAIRE. — Soit un cube d'une substance isotrope (fig. 6), de volume v_0 à 0 °C. Portons-le à t °C. Chacune de ses arêtes l_0 subit un allongement et devient :

$$l = l_0(1 + \lambda t).$$

Le volume devient donc :

$$v = l^3 = l_0^3(1 + \lambda t)^3 = l_0^3(1 + 3\lambda t + 3\lambda^2 t^2 + \lambda^3 t^3).$$

Comme $l_0^3 = v_0$,

$$v = v_0(1 + 3\lambda t + 3\lambda^2 t^2 + \lambda^3 t^3).$$

L'augmentation du volume par unité de volume et par degré est donc :

$$k = \frac{v - v_0}{v_0 t} = 3\lambda + 3\lambda^2 t + \lambda^3 t^2.$$

La valeur numérique de λ est très faible (de l'ordre de 2×10^{-5}). Si on détermine le coefficient *moyen* de dilatation cubique entre 0° et 100°, les trois termes exprimés ont comme valeurs :

$$3\lambda = 3 \times 2 \times 10^{-5}$$
$$3\lambda^2 t = 3 \times 4 \times 10^{-8}$$
$$\lambda^3 t^2 = 2 \times 2 \times 2 \times 10^{-11}.$$

Les deux derniers termes étant toujours négligeables devantl e premier, nous pourrons écrire :

$$\boxed{k \simeq 3\lambda.}$$

Le coefficient de dilatation cubique est à peu près égal au **triple** *du coefficient de dilatation linéaire.*

Application numérique : *Une bonbonne en verre contient* 10 *l à* 0° *C. Quelle est la variation de sa capacité de* 0 °C *à* 30 °C*? Le coefficient de dilatation linéaire du verre est :* $0{,}9.10^{-5}$.

$$v_{30} - v_0 = v_0 kt$$
$$= 10\,000 \times 3 \times 0{,}9 \times 10^{-5} \times 30$$
$$= 8{,}1 \text{ cm}^3$$

c'est la contenance moyenne d'un verre à liqueurs.

Remarque. — Bien que le coefficient k soit trois fois plus grand que le coefficient λ de la dilatation linéaire, il reste encore faible et n'est pas connu avec une meilleure précision. C'est pourquoi, dans les calculs des *variations de volume* des corps solides ou des cavités, au voisinage d'une température t, on peut remplacer le volume v_0 (à 0 °C) par le volume v, (à t °C).

C. APPLICATIONS DE LA DILATATION DES SOLIDES

8. VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE. — Soit un solide de volume v_0 à 0 °C et de masse m. A 0° C sa masse volumique est :

$$\rho_0 = \frac{m}{v_0}.$$

Le solide, porté à t °C, prend un volume $v = v_0(1 + kt)$, mais sa masse reste invariable. La masse volumique devient :

$$\rho_t = \frac{m}{v_0(1 + kt)}.$$

Soit, en remplaçant m/v_0 par ρ_0 :

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + kt}.$$

La masse volumique d'un solide est inversement proportionnelle au binôme de dilatation cubique. Ainsi, pour l'aluminium, dont la masse volumique à 0 °C est 2,60 g/cm³, si on admet entre 0 °C et 600 °C un coefficient de dilatation linéaire *moyen* de l'ordre de $2{,}3 \times 10^{-5}$, on aura, à 600 °C, comme masse volumique :

$$\rho_{600} = \frac{2{,}6}{1 + 3 \times 2{,}3 \times 10^{-5} \times 600} \simeq 2{,}49 \text{ g/cm}^3.$$

9. CORRECTION AUX MESURES DE LONGUEURS A L'AIDE DE RÈGLES GRADUÉES. — Soit une règle en métal dont le coefficient de dilatation linéaire est λ, graduée exactement à 0°. Soit L une longueur *lue* sur la règle à la température $+ t$ °C. Comme la règle mesurait exactement L à 0 °C, sa longueur réelle est maintenant

$$L(1 + \lambda t)$$

et, en adoptant L comme résultat de la mesure, on commet une erreur absolue :

$$\Delta L = \underset{\text{(lue)}}{L}.\lambda.t$$

La correction à apporter à la lecture dépend donc :

de la *longueur* lue,
du *métal* qui constitue la règle,
de la *température.*

Précisons son importance par un exemple numérique : *On lit, à* 0 °C, *une longueur de* 50 *cm sur une règle en laiton graduée à* 20 °C. *Quelle est la longueur exacte? Le coefficient de dilatation linéaire du laiton est* : $\lambda = 1{,}8 \times 10^{-5}$.

$$\Delta L = 50 \times 1{,}8 \times 10^{-5} \times 20 \simeq 0{,}018 \text{ cm}.$$

La longueur exacte est

$$L_{\text{exacte}} = 50 + 0{,}018 = 50{,}018 \text{ cm}.$$

Si la règle est graduée en millimètres, c'est-à-dire si l'on admet que l'erreur de lecture, à l'œil nu, peut atteindre 1/2 mm (T. P.), il sera inutile de s'inquiéter de faire la correction ci-dessus. Dans les mesures plus précises, on devra en tenir compte.

10. COMPENSATION DES HORLOGES. — La marche d'une horloge est réglée par la longueur de son balancier : une horloge réglée en hiver *retarde en été* quand son balancier s'*allonge*.

Or, le réglage est assuré de façon convenable quand le centre de gravité G du système rigide formé par la tige T et la lentille L du balancier reste à une distance constante de l'axe d'oscillation O (fig. 7).

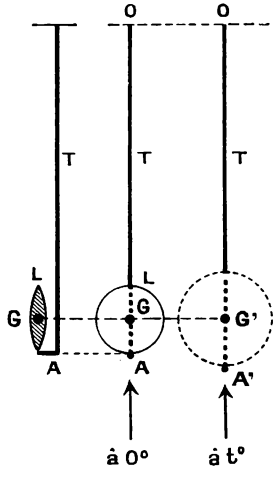


FIG. 7. — *Type de balancier compensé.*

Parmi les nombreux dispositifs de **balanciers compensés** permettant un réglage automatique, la figure montre comment on a utilisé *l'association de deux métaux de coefficients de dilatation différents*, l'un formant la tige, l'autre la lentille.

Supposons que la température passe de 0° à *t*°. La tige s'allonge, le point A vient en A′ (les dilatations sont fortement exagérées sur la figure), mais la lentille se dilate également et son centre de gravité se relève. On peut calculer les dimensions à donner à la tige et à la lentille pour que OG = OG′.

Le problème a reçu de nos jours une solution à peu près parfaite avec l'emploi de l'alliage **invar** pour la construction des balanciers. Le tableau du paragraphe 5 nous montre que l'invar se dilate environ 10 fois moins que l'acier ordinaire et 20 fois moins que le laiton.

Tous les balanciers actuels pour horloges de précision sont construits en invar, ce qui n'exclut d'ailleurs pas l'utilisation d'un système compensateur.

11. FORCES MISES EN JEU DANS LES DILATATIONS. — Ces forces sont considérables.

Une barre de fer de 50 cm, échauffée de 100°, s'allonge de 0,6 mm. Si on l'empêche de s'allonger en la plaçant entre deux butées, elle exerce sur celles-ci des forces proportionnelles à sa section; dans le cas cité, la force atteint 1 250 kgf pour une section de 1 cm². Ces forces, souvent gênantes en pratique, sont parfois utiles.

a) **Les constructions métalliques** doivent être prévues pour permettre à leurs éléments de subir des variations de longueur d'hiver en été. Ainsi les poutres métalliques qui supportent le tablier des ponts reposent sur des *galets* ou *rouleaux* en acier par une de leurs extrémités, ce qui permet leur dilatation (fig. 8). On laisse un intervalle de quelques millimètres entre *deux rails de chemin de fer* au moment de la pose. Dans les *toitures en zinc*, les feuilles de zinc ne sont fixées que par *un de leurs côtés*.

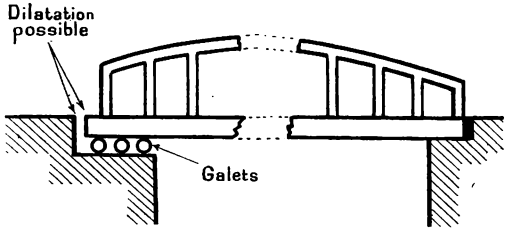


FIG. 8. — *Pont sur galets.*

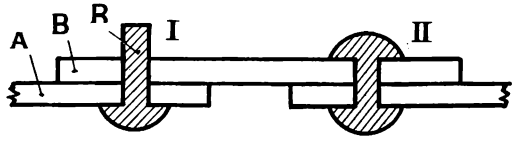


FIG. 9. — *Rivetage à chaud.*

b) **Cerclage, rivetage.** — On sait comment les forgerons profitent du retrait d'un cercle de fer pour serrer fortement les différents éléments d'une roue. Dans le rivetage à chaud (fig. 9, I), le rivet R fortement chauffé traverse les deux plaques A et B à assembler; un martelage à chaud écrase alors sa tige. Pendant le refroidissement, un serrage puissant se produit et se conserve à froid (fig. 9, II.)

c) **Verrerie de laboratoire.** — Un verre ordinaire, assez épais, se brise quand on y verse de l'eau très chaude. C'est que le verre *conduit mal la chaleur*. Les parties en contact avec l'eau chaude se dilatent avant les parties extérieures, créant ainsi des forces considérables qui entraînent la rupture. La verrerie moderne en *quartz, silice fondue, verre Pyrex*, etc., n'a pas cet inconvénient. Elle conduit passablement la chaleur, et possède surtout un *très faible coefficient de dilatation* (tableau du § 5) ce qui élimine à peu près complètement les risques fâcheux. Un creuset de silice chauffé au rouge blanc peut être plongé brusquement dans l'eau froide sans se briser.

La figure 1 représente des objets en silice fondue et en Pyrex utilisés au laboratoire.

Le **platine** se soude particulièrement bien au verre ordinaire, car il possède le même coefficient de dilatation; les variations de température ne provoquent donc aucune force parasite au niveau de la soudure. On le remplace actuellement par la **platinite** (tableau du § 5), alliage de même coefficient de dilatation et beaucoup moins coûteux.

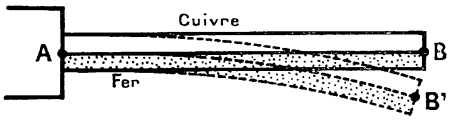


FIG. 10. — *Bilame fer-cuivre.*

d) **Bilames.** — Soient deux métaux, Fer et Cuivre par exemple, formant deux lames soudées par l'une de leurs faces AB (fig. 10).

Sous l'influence d'une élévation de température, les deux métaux se dilatent inégalement et la **bilame** s'incurve du côté du métal *de plus faible coefficient de dilatation.* Le déplacement BB' peut être utilisé comme indicateur de température, pour commander un organe de machine, fermer un circuit électrique, remonter une horloge, etc.

D. DILATATION DES LIQUIDES

12. DILATATION APPARENTE ET DILATATION ABSOLUE. — Expérience. — Reprenons l'expérience du paragraphe 2, leçon 19; elle permet l'analyse du phénomène de la dilatation d'un liquide dans un ballon de verre (fig. 11). Si **a** est le niveau initial du liquide dans son enveloppe et **g** le niveau final, le volume compris entre **a** et **g** ne représente pas la valeur exacte de la dilatation du liquide, puisque le récipient lui-même s'est dilaté. Ce volume n'est que la ***dilatation apparente*** du liquide.

Si le liquide pouvait se dilater sans être contenu dans une enveloppe, on assisterait à l'augmentation *réelle* de son volume, appelée ***dilatation absolue.***

Il n'est évidemment pas possible d'observer un liquide en dehors d'une enveloppe solide : seule la dilatation apparente semble avoir un intérêt pratique. En fait, elle dépend de chaque enveloppe; c'est dire que pour un liquide donné il existe autant de phénomènes de dilatation apparente que de récipients différents.

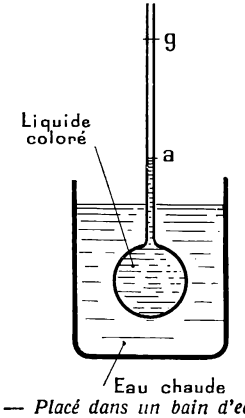


FIG. 11. — *Placé dans un bain d'eau chaud le liquide subit une dilatation apparente de* **a** *à* **g.**

Au contraire, la *dilatation absolue* est indépendante de l'enveloppe; elle seule peut être ***caractéristique du liquide.***

13. COEFFICIENT DE DILATATION ABSOLUE. FORMULE DE LA DILATATION. — L'augmentation réelle du volume d'un liquide est proportionnelle au volume initial et à l'élévation de la température, comme pour les solides. Par analogie, nous donnerons la définition suivante :

Définition : ***Le coefficient de dilatation absolue d'un liquide est numériquement égal à l'augmentation de volume que subit l'unité de volume de ce liquide, pris à 0 °C, pour une élévation de température d'un degré Celsius.***

L'augmentation de volume et le volume initial sont exprimés avec la même unité.

Si V_0 est le volume à *0* °C, V le volume à t °C, le coefficient ***(m)*** s'exprime par :

$$m = \frac{V - V_0}{V_0 . t}.$$

D'où l'on tire la *ormule de la dilatation absolue :*

$$\boxed{V = V_0 (1 + m.t)}$$

(1 + m.t) est le ***binôme de dilatation absolue.***

14. VALEURS NUMÉRIQUES. — On comprend qu'il doit être assez difficile d'étudier la dilatation absolue d'un liquide, à cause de la complication apportée par la dilatation de l'enveloppe qui le contient. Mais si on connaît avec précision le coefficient ***m*** pour un liquide particulier, on peut utiliser le résultat pour déterminer, avec la même enveloppe, par comparaison, les coefficients de dilatation absolue d'autres liquides. La mesure précise de ***m*** a été effectuée en 1818 pour le *mercure*, par une méthode originale, due aux physiciens français DULONG et PETIT [1]. De là on a tiré les valeurs du coefficient de dilatation absolue des liquides usuels, que rassemble le tableau :

COEFFICIENTS DE DILATATION ABSOLUE
(au voisinage de la température ordinaire)

mercure : $1{,}82 \times 10^{-4}$	Alcool : 1×10^{-3} Toluène : $1{,}1 \times 10^{-3}$ Benzène : $1{,}2 \times 10^{-3}$ Acétone : $1{,}4 \times 10^{-3}$ Éther : $1{,}5 \times 10^{-3}$ Pentane : $1{,}6 \times 10^{-3}$ Glycérine : $0{,}5 \times 10^{-3}$	***Eau*** dilatation anormale aux températures ordinaires

Ce ne sont là que des valeurs approchées : la dilatation des liquides est beaucoup moins régulière que celle des solides; les coefficients de dilatation absolue dépendent nettement de la température.

Nous remarquons :

---

(1) DULONG, PETIT (V. notices biographiques).

a) que le coefficient de dilatation absolue des liquides est ***de l'ordre de*** $\frac{1}{1\,000}$. Les liquides se dilatent environ ***20 fois plus que les solides.***

b) que le mercure se dilate environ 5 fois moins que la plupart des autres liquides. Nous savons que, malgré cette faible dilatation, on l'a cependant choisi comme liquide thermométrique.

c) que l'eau ne figure pas, numériquement, dans le tableau; c'est que l'eau présente une dilatation particulière, anormale.

15. DILATATION ANORMALE DE L'EAU AU VOISINAGE DE 0 °C.

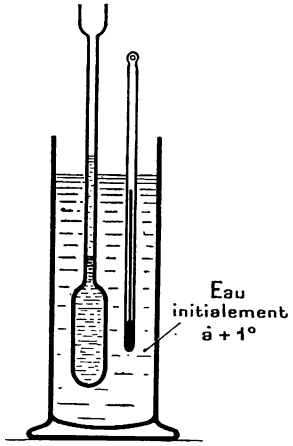


FIG. 12. — *Étude expérimentale de la dilatation de l'eau aux basses températures.*

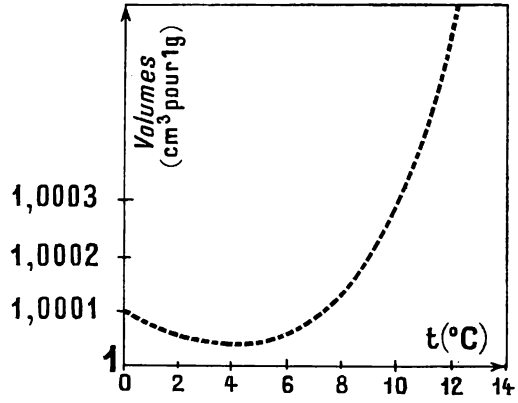


FIG. 13.

Expérience : Garnissons d'eau pure un *dilatomètre* que nous plaçons dans un bain d'eau très froide (eau provenant de la fusion de morceaux de glace, et dont la température ne dépasse pas + 1°) (fig. 12).

Laissons le tout se réchauffer lentement et notons, pour chaque température, le niveau de l'eau pure dans la tige du dilatomètre.

Nous verrons ce niveau *s'abaisser* pendant que la température passe de + 1° à + 4° environ, *rester stationnaire* pour les températures voisines de + 4°, *s'élever ensuite* pour les températures supérieures à + 4°.

Une étude plus précise peut être faite en tenant compte de la dilatation de l'enveloppe; elle fournit les résultats indiqués par la courbe de la figure 13. En ordonnées on a porté les volumes successifs pris par une masse d'eau pure égale à *1 gramme* quand la température s'élève.

Résultats : Une anomalie remarquable apparaît :

1° De zéro à + 4 °C, l'eau *se contracte.* Son coefficient de dilatation absolue est négatif.

2° Au voisinage de + 4 °C, l'influence d'une variation de la température sur le volume est à peu près nulle. Le volume massique [1] passe par un minimum. L'eau présente donc vers + 4 °C un *maximum de densité.*

3° Au-dessus de + 4°, l'eau suit la *règle générale* des liquides, mais sa dilatation est bien loin d'être régulière, la courbe s'éloignant très sensiblement d'une droite.

E. APPLICATIONS DE LA DILATATION DES LIQUIDES

16. — La dilatation des liquides étant en moyenne beaucoup plus notable que celle des solides, on comprend qu'elle doit avoir d'importantes conséquences pratiques.

En dehors de la fabrication des *thermomètres à liquides,* les principales applications sont dues à la variation de la masse volumique quand la température varie, suivant la relation :

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + m.t}.$$

Rappelons en effet que les liquides sont des *fluides,* c'est-à-dire que les différentes portions de matière qui constituent une masse liquide peuvent glisser et se déplacer les unes par rapport aux autres sans que la forme générale en soit visiblement affectée. Ils s'opposent en cela aux solides qui ne changent pas de forme sans d'énergiques actions extérieures. Il en résulte les conséquences suivantes :

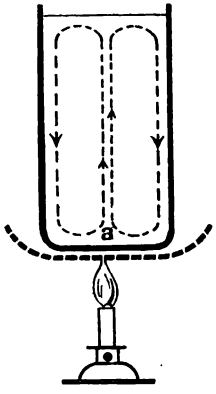


FIG. 14. — *Courants de convection.*

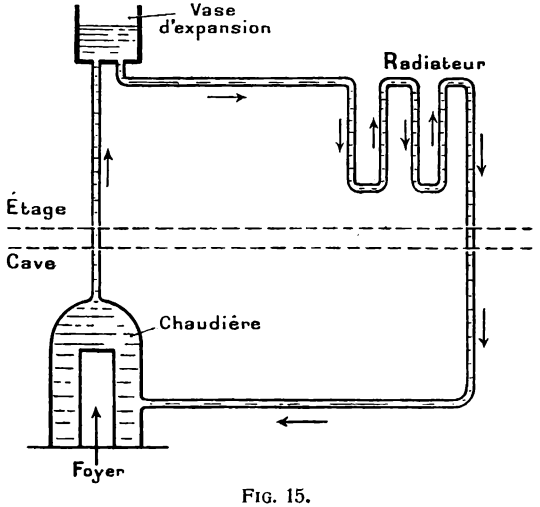


FIG. 15.

a) **Courants de convection.** — Chauffons dans un vase assez haut et assez large un liquide (de l'eau, par exemple) mélangé de légères particules terreuses ou de sciure de bois (fig. 14). Réalisons un chauffage modéré et localisé dans l'axe du vase vers la

(1) *Volume massique* : volume de l'unité de masse.

région **a**. Nous voyons bientôt s'établir de véritables *courants* de liquides, dits ***courants de convection,*** rendus visibles par le déplacement des particules solides. Le liquide du vase n'a pas tous ses points à la même température; en **a**, les portions plus chaudes, et par conséquent plus légères, s'élèvent comme dans une cheminée. Le liquide froid du sommet est chassé et descend le long des parois. Quand la température de toute la masse finit par s'égaliser, les courants de convection s'arrêtent.

Grâce aux courants de convection, on peut ainsi réaliser des déplacements d'eau importants dans des enceintes à température non uniforme. Dans les installations de *chauffage central à eau chaude* (fig. 15), le foyer, placé en général au point le plus bas de l'immeuble, échauffe fortement de l'eau qui s'élève dans les canalisations, traverse les radiateurs où elle abandonne sa chaleur, se refroidit et redescend alors vers la chaudière. Le circuit d'eau est donc *fermé* et les conduites complètement remplies d'eau. Pour éviter que la dilatation générale du liquide, qui dépend de l'allure à laquelle est réglée la chauffe, ne provoque l'éclatement des conduites, un *vase d'expansion* est aménagé au point le plus haut. L'eau peut s'y dilater librement.

b) **Masse volumique de l'eau à + 4 °C.** — La figure 13 montre qu'au voisinage de + 4 °C le *volume massique* de l'eau passe par un minimum. La *masse volumique* passe donc par un maximum et se trouve, dans cette région, à peu près *indépendante de la température.* C'est pourquoi on avait pu autrefois adopter comme unité de masse celle d'un décimètre-cube d'eau pure à + 4 °C. On sait que l'étalon actuel (masse du cylindre international) n'a théoriquement plus rien de commun avec le choix ancien.

La masse de 1 dm^3 d'eau pure, à + 4 °C, a été comparée au kilogramme. Elle est égale à 999,973 grammes. En adoptant la valeur approchée 1 000 grammes on ne fait qu'une erreur relative très faible : 27 millionièmes!

c) **Mercure normal; correction barométrique.** — La hauteur de la colonne de mercure qui équilibre la pression atmosphérique est inversement proportionnelle à son poids volumique. Comme celui-ci dépend de la température, il en résulte qu'une même pression atmosphérique n'est pas mesurée par la même hauteur de mercure si la température varie.

Pour cette raison, les valeurs de la pression atmosphérique sont exprimées en centimètres de **mercure normal** (mercure à 0 °C; masse volumique : 13,595 g/cm^3).

On doit donc, dans toute lecture de la pression atmosphérique au laboratoire, noter la température et effectuer une correction. La température étant presque toujours supérieure à 0°, la correction fournira, en centimètres de mercure normal, un nombre *inférieur* au nombre lu sur le baromètre.

Comparons sur un exemple numérique l'influence de la température sur la *règle graduée* qui sert aux mesures et sur le *mercure* :

Soit $H = 750$ mm la longueur de la colonne mercurielle, mesurée avec une règle en laiton ($\lambda = 1{,}8 \times 10^{-5}$) à la température $t = +20°$, le coefficient de dilatation absolue du mercure étant $m = 1{,}8 \times 10^{-4}$.

La longueur *exacte* de la colonne, à $t°$ est (§ 9) : $H' = H(1 + \lambda t)$.

Mais si le mercure était à 0 °C, son poids volumique, plus élevé, serait $\varpi_0 = \varpi(1 + m.t)$. Il occuperait alors une hauteur plus faible : $H_0 = \dfrac{H'}{1 + m.t}$.

Donc :

$$H_0 = H\frac{1 + \lambda t}{1 + mt}$$

numériquement :

$$H_0 = 750\frac{1 + 1{,}8 \times 10^{-5} \times 20}{1 + 1{,}8 \times 10^{-4} \times 20} = 747{,}6 \text{ mm.}$$

Comparons les ordres de grandeur des deux corrections imposées par la température + 20° :

a) Dilatation de la règle :

Correction $= H' - H = H.\lambda.t = 750 \times 1{,}8 \times 10^{-5} \times 20 = 0{,}27$ mm.
(à ajouter)

b) Dilatation du mercure :

Correction $= H_0 - H = H.m.t = 750 \times 1{,}8 \times 10^{-4} \times 20 = 2{,}7$ mm.
(à retrancher)

La seconde est 10 *fois plus importante que la première et ne peut jamais être négligée.*

EXERCICES

1. Comment pourrait-on compléter l'expérience décrite au paragraphe 2 pour déterminer le coefficient de dilatation linéaire de la tige métallique?

2. Quelle est la variation de hauteur de la Tour Eiffel (hauteur moyenne : 300 m) entre les températures : — 10° (hiver) et + 40° (été)?

3. Quelle erreur systématique fait-on en mesurant à 0° des longueurs de l'ordre de 1 m avec un mètre en duralumin gradué à + 20°? (coefficient de dilatation du duralumin : $2{,}3 \times 10^{-5}$).
Rép. : 0,46 mm.

4. En mesurant une règle en laiton à + 28°, on a trouvé 1 000,20 mm. Quelle est la longueur de la règle à + 20°? Rép. : 1 000,05 mm.

5. Deux rails de chemin de fer AB et BC rectilignes sont dans le prolongement l'un de l'autre. Leur longueur AB = BC = 24 m. Ils se touchent au point B.
En supposant que les points A et C restent fixes et que B se déplace, les rails restant rectilignes, quel sera ce déplacement pour une élévation de température de 20°? (coefficient de dilatation linéaire de l'acier : $\lambda = 1{,}2.10^{-5}$).
Rép. : BB' $\simeq$ 52 cm.

6. Deux tiges métalliques A et B ont la même longueur $l = 40$ cm à 0°. A 20°, l'une a 0,048 mm de plus que l'autre, et, mises bout à bout, elles ont une longueur totale de 80,0416 cm. Quels sont les deux coefficients de dilatation? Rép. : 2,9 et $2{,}3 \times 10^{-5}$

7. On mesure au *comparateur* la longueur d'une tige métallique. Les résultats sont les suivants : longueur à 0° : 100,203 cm; longueur à + 50° : 100, 250 cm.
Quel est le coefficient de dilatation linéaire du métal? Sachant que les mesures de longueur sont faites à 1/100 de mm près et que les températures sont repérées à 1/50 de degré près, donner la valeur de λ avec un nombre correct de décimales.
Rép. : $\lambda = (1{,}06 \pm 0{,}04) \times 10^{-5}$.

8. Définir le coefficient de dilatation *superficielle* d'un solide : s.
Montrer que : $s \simeq 2\lambda$.

9. Une roue dont le diamètre est 1,70 m est cerclée de fer avec un cercle porté à 900°. Quel sera le diamètre de la roue après refroidissement à 20°?
Rép. : 168 cm.

10. Une citerne en fer a une contenance de 1 000 *l* à + 20°. Quelle est sa contenance à + 10°?
Rép. : 999,64 *l*.

11. Une pipette de laboratoire, en verre de coefficient de dilatation linéaire 10^{-5}, jaugée à + 20°, a un volume de 20 cm³. Sachant que son emploi comporte, dans tous les cas, des erreurs d'affleurement de l'ordre de 0,02 cm³, doit-on faire la correction de température quand on opère à + 10°? Rép. : non.

12. Le réservoir d'un thermomètre à mercure a un volume de 0,75 cm^3 à 0°. Quel doit être le diamètre intérieur du canal de la tige pour que sur cette tige un degré soit représenté par 2 cm? (on ne tiendra pas compte de la dilatation du verre). Rép. : 0,092 mm.

13. Quel est le poids volumique du mercure à + 40°? (poids volumique à 0° : 13,59 g/cm^3). Rép. : 13,50 g/cm^3.

14. 1 cm^3 d'alcool à 0° est porté à + 20°. Quel est son nouveau volume? (coefficient de dilatation absolue de l'alcool : 10^{-3}.) Rép. : 1,020 cm^3.

15. Donner la forme de la courbe représentative du *poids* volumique de l'eau entre 0° et + 8° (se reporter au § 15).

16. Un tube de verre cylindrique renferme une colonne de mercure de longueur 20 cm à 0°. Quelle est la longueur de la colonne quand on porte le tout à + 50°? (Coefficient de dilatation linéaire du verre : 10^{-5}. Coefficient de dilatation absolue du mercure : $1{,}8.10^{-4}$.) Rép. : 20,16 cm.

17. On prélève, à la température + 30°, de l'alcool à l'aide d'une pipette jaugée dont le volume est 10 cm^3 à + 20°. Quel est la masse d'alcool prélevé (masse volumique de l'alcool à 0° : 0,80 g/cm^3; coefficient de dilatation absolue de l'alcool : 10^{-3}; coefficient de dilatation linéaire du verre : 10^{-5}). Rép. : 7,682 g.

18. Un réservoir en verre gradué possède un coefficient de dilatation cubique égal à k. On y introduit un liquide de coefficient de dilatation absolue m qui occupe un volume V_0 à 0°. On chauffe à t° et le liquide occupe un volume apparent V' lu sur l'enveloppe de verre. Montrer qu'on peut définir un coefficient de dilatation *apparente* du liquide $m' = \dfrac{V' - V_0}{V_0.t}$.

Montrer que l'on a : $m \simeq m' + k$.

19. Comment peut-on, à l'aide d'une balance sensible mesurer le coefficient de dilatation absolue d'un liquide par application du théorème d'Archimède? Quel genre de solide pourrait-on prendre comme flotteur?

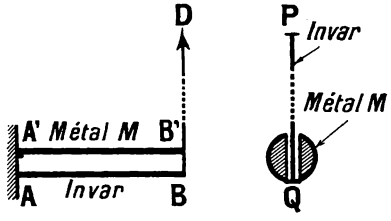
PROBLÈMES

1. On dispose d'une tige rectiligne en alliage invar AB et d'une tige identique $A'B'$ en métal M dont le coefficient de dilatation linéaire est inconnu. Les deux tiges, de même longueur 20 cm à 0 °C sont placées dans un même four, parallèlement l'une à l'autre et à une distance de 2 cm. Les points A et A' sont fixes; AA' est perpendiculaire aux deux tiges. Une aiguille BD, de longueur $BD = 50$ *cm*, s'articule en B *et* B' (fig.).

1° La température du four passant de *0 °C* à *200 °C*, la pointe D de l'aiguille se déplace de 22 mm. Calculer le coefficient de dilatation linéaire du métal M. Coefficient de dilatation linéaire de l'invar : $0{,}12 \times 10^{-5}$.

2° Quel est le déplacement du milieu de BB'?

3° On construit un balancier d'horloge avec une tige PQ en invar mesurant *100 cm* à 0 °C, supportant, par le point Q une lourde lentille en métal M. Quel doit être, à 0 °C, le rayon de la lentille pour que le centre de gravité soit indépendant de la température, ce qui assure une marche satisfaisante de l'horloge? (On pourra négliger le poids de la tige devant le poids de la lentille.)



4° Serait-il possible d'envisager une telle compensation avec une tige en métal M supportant une lentille en invar?

2. Un objet massif en silice fondue est suspendu à l'une des extrémités du fléau d'une balance. Son poids est égal à 82,70 gf. On immerge complètement cet objet dans de l'eau à 4 °C et l'on constate alors qu'il subit une perte apparente de poids égale à 37,59 gf. On répète la mesure après avoir porté l'eau à 80 °C, et l'on trouve que la perte apparente de poids devient égale à 36,54 gf.

Expliquer ces observations et, négligeant la dilatation de la silice fondue, calculer :

1° le volume de l'objet,

2° le poids volumique de la silice fondue,

3° le poids volumique de l'eau à 80 °C,

4° le coefficient moyen de la dilatation de l'eau entre 4 °C et 80 °C.

3. Dans un thermomètre à mercure dont la tige est graduée de 0 à 100 parties d'égal volume, on sait que le volume du réservoir comprend N = 6 480 fois le volume d'une division.

1° Calculer le coefficient de dilatation cubique du verre constituant l'enveloppe du thermomètre, sachant que le mercure remplissant le réservoir jusqu'à la division 0 dans la glace fondante monte jusqu'à la division 20,0 à 20 °C.

2° On vide le thermomètre et on y introduit jusqu'au zéro de la graduation un liquide dont le coefficient de dilatation est inconnu; ce remplissage est effectué dans la glace fondante. A 20° le liquide monte jusqu'à la division 61,4. Calculer le coefficient de dilatation absolue du liquide.

Coefficient de dilatation absolue du mercure : 0,000 181.

4. Un appareil pour la mesure des densités des liquides comporte un fléau qui repose sur un couteau et auquel sont suspendus d'un même côté du couteau un petit cylindre de verre entièrement clos, de volume extérieur $v = 5$ cm³, à une distance du couteau $a = 15$ cm, et un plateau pouvant recevoir des masses, à une distance du couteau $a' = 5$ cm. Un contrepoids équilibre le tout : faire un croquis.

1° On plonge entièrement le cylindre dans le liquide étudié et on rétablit l'équilibre par des masses dans le plateau. Ces masses valent 16,385 g; quelle est la densité du liquide? Quelle est la plus grande erreur qu'on peut admettre sur la masse si l'on veut que l'erreur sur la densité ne dépasse pas une unité de la quatrième décimale?

2° Le liquide étudié est un mélange d'eau et d'un autre liquide de propriétés très voisines (« eau lourde »), dont les densités respectives sont (à la température de 15° à laquelle sont faites les mesures) 0,9991 et 1,1065. Quelle est la composition en volume du mélange ci-dessus? La pesée étant faite à 1 mg près, à combien près cette composition est-elle connue?

3° Au voisinage de la température de 15° les coefficients de dilatation cubique valent : pour l'eau, $18{,}0.10^{-5}$ et pour le verre du cylindre, $2{,}7.10^{-5}$. Quelle est la variation de température qui entraînerait sur la densité une erreur d'une unité de la quatrième décimale? *(Bacc. 1946).*

TRAVAUX PRATIQUES

N° 19. Coefficient de dilatation linéaire d'un solide.

N° 20. Dilatation de l'eau.

J^ph L^is GAY-LUSSAC
(Physicien et Chimiste),
Membre de l'Académie royale des Sciences,
de la société royale de Londres &a.
Né à S^t Léonard (Dep^t de la H^te Vienne) le 6 Décembre 1778.

*« **Les gaz se condensent à proportion des poids dont ils sont « chargés.** »*

MARIOTTE

*« **Placés dans des conditions semblables** (aux solides et aux liquides) **les gaz présentent des lois simples et régulières.** »*

GAY-LUSSAC

Les premiers Physiciens qui decouvrirent les lois des gaz furent frappés par leur simplicité.
Bien que des expériences plus précises aient révélé que les gaz réels s'écartent un peu de ces lois, elles restent valables avec une très bonne approximation.

21. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES GAZ

1. — Les gaz sont, comme les liquides, des *fluides*, mais il s'en distinguent en particulier par leur absence de surface libre quand ils sont en contact avec d'autres gaz; l'éloignement mutuel de leurs molécules, animées de vifs mouvements et à peu près indépendantes les unes des autres, favorise leur mélange, par diffusion.

Précisément, à cause de leur matière très dispersée et à l'inverse des solides et des liquides, les gaz changent aisément de volume quand on fait varier la pression ou la température.

Expériences :

a) Imaginons trois corps de pompe identiques, très résistants (fig. 1) contenant à la pression atmosphérique le même volume

d'un solide (par exemple du fer),
d'un liquide (— de l'eau),
d'un gaz (— de l'air).

La température restant fixe exerçons sur les trois corps une *même pression*, par l'intermédiaire de trois pistons qui s'adaptent exactement aux trois corps de pompe.

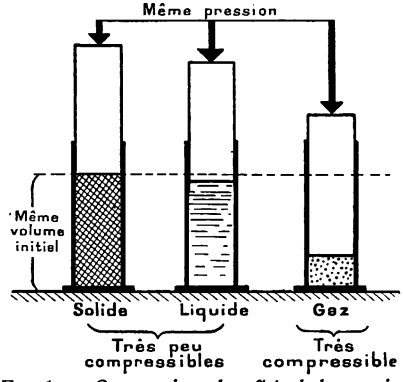


FIG. 1. — *Comparaison des effets de la pression sur le volume des solides, des liquides et des gaz.*

Les résultats sont très différents :

le *solide* ne subit *aucune déformation visible*;

le *liquide* subit une *très légère diminution de volume*; pour diminuer le volume de l'eau de 1/10 de sa valeur il faudrait le soumettre à une pression de 3 000 atmosphères;

le *gaz* subit une *très grande diminution de volume*; pour diminuer le volume de l'air de 1/10 de sa valeur, il suffit de lui appliquer une pression de 1,11 atm.

Ainsi, *à une température donnée*, une variation de pression doit être très grande pour avoir un effet visible sur le volume des solides et des liquides; pour les gaz, au contraire pression et volume dépendent largement l'un de l'autre.

b) Soit une masse de gaz enfermée dans un récipient tel que celui que représente la figure 2; à tout instant nous pouvons connaître :

— son **volume** : le tube où se déplace le mercure est gradué, et l'ampoule a été préalablement jaugée.

— sa **température** : un thermomètre indique l'équilibre thermique avec le bain de l'étuve.

— sa **pression** : pression atmosphérique locale, augmentée de la hauteur h de mercure.

En modifiant t (échauffement ou refroidissement) et p (addition de mercure par l'entonnoir, par exemple) nous pouvons observer des variations assez importantes du volume v.

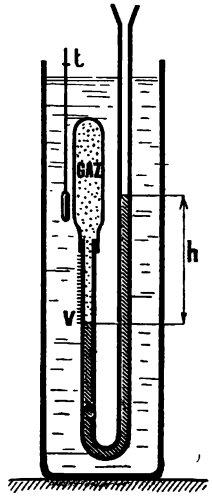


FIG. 2. — *Le volume d'une masse gazeuse dépend à la fois de la pression et de la température.*

TROIS VARIABLES D'ÉTAT, TROIS PROBLÈMES. — Pour une masse donnée d'un corps à l'état gazeux, les trois grandeurs **pression, volume, température** sont donc étroitement *liées*; on dit que ce sont les trois variables qui *définissent l'état du gaz*, ou ***variables d'état.***

L'étude des propriétés des gaz devra donc être fragmentée en **trois** problèmes particuliers; dans chacun de ces problèmes, une variable étant maintenue fixe, on étudiera comment sont liées les deux autres. Il faudra donc envisager :

1° A ***température constante*** : relation entre *Pression* et *Volume.*

2° A ***pression constante*** : relation entre *Volume* et *Température.*

3° A ***volume constant*** : relation entre *Pression* et *Température.*

A. TEMPÉRATURE CONSTANTE LOI DE MARIOTTE [1]

2. EXPÉRIENCE. — Soit un tube A, en verre gradué, fermé à sa partie supérieure par un robinet et communiquant à la partie inférieure par un tube *long* et *souple* (caoutchouc ou matière plastique) avec un réservoir R (fig. 3).

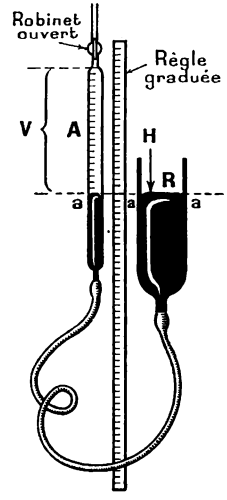


FIG. 3.

Ouvrons le robinet et versons du mercure dans R; le tube et le réservoir se remplissent partiellement de mercure et le niveau *a* est le même des deux côtés. Immobilisons A et R, et, par la fermeture du robinet, emprisonnons une certaine masse d'air dans la partie supérieure du tube gradué. Les trois variables d'état sont faciles à déterminer :

Volume : V lu sur la graduation.

Pression: H lue au baromètre du laboratoire.

Température : *t* lue au thermomètre du laboratoire.

Pendant toute la durée des expériences cette température restera *constante*, par exemple 15 °C.

1° Abaissons le réservoir R; le mercure descend dans le tube A; quand il est de nouveau en équilibre (fig. 4), nous constatons :

a) que le *volume* de l'air a *augmenté*; il est maintenant $V_1 > V$;

b) que la *pression* de l'air a *diminué*; en effet les deux points M et N du même plan horizontal supportent les mêmes pressions : si P_1 est la pression de l'air dans A (évaluée en hauteur du mercure), on a :

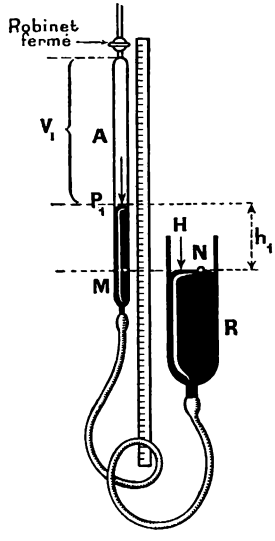


FIG. 4.

(1) MARIOTTE, physicien français (notice biographique). La loi qui porte son nom fut découverte à peu près à la même époque par le savant anglais *Boyle*.

$$P_M = P_1 + h_1$$

$$P_N = H$$

d'où :

$$P_1 = H - h_1$$

h_1 peut être mesuré à l'aide de la règle graduée.

Répétons l'expérience en abaissant plusieurs fois le réservoir; nous notons des volumes *croissants* :

$$V < V_1 < V_2 < V_3...$$

et des pressions *décroissantes* :

$$H > P_1 > P_2 > P_3...$$

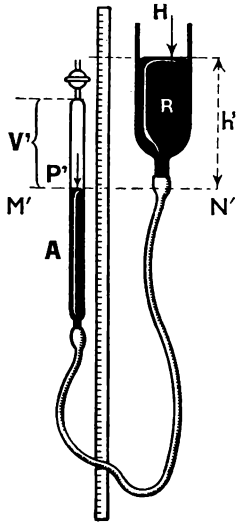


FIG. 5.

2° Soulevons maintenant le réservoir au-dessus de sa position initiale; le mercure monte dans le tube A. A l'équilibre, nous constatons (fig. 5) :

a) que le *volume* d'air *a diminué* : $V' < V$;

b) que la *pression* de l'air *a augmenté* : $P' > H$. En effet, on a, sur le niveau horizontal M'N' :

$$P' = H + h'.$$

En renouvelant l'expérience, R s'élevant toujours, nous notons des volumes *décroissants :*

$$V > V' > V'' > V'''...$$

et des pressions correspondantes *croissantes :*

$$H < P' < P'' < P'''...$$

Conclusion. — Pour une masse donnée de gaz, à température constante, *le volume et la pression varient en sens inverse.*

Existe-t-il une relation simple entre ces deux grandeurs?

Rassemblons les résultats numériques dans un tableau, en ordonnant les volumes :

température fixe : + 15 °C			
EXPÉRIENCE N°	VOLUMES (cm^3)	HAUTEURS (h ou h' en cm)	PRESSIONS (cm-Hg) ($H - h$ ou $H + h'$)
1	49,5	36	38
2	45	32,5	41,5
3	30	12	62
4	25	0	74
5	20	19,5	93,5
6	18	29,5	103,5
7	15	50	124
8	12	81	155

Un examen rapide nous montre que si le volume est *divisé par 4* environ, la pression est *multipliée par 4.* Ces variations nous suggèrent d'effectuer, pour chacune des expériences, le *produit* des nombres qui mesurent la pression et le volume. Ces produits sont très voisins :

1881

1865

1860

1850

1870

1883

1860

1860

En choisissant des échelles convenables sur deux axes de coordonnées portons alors en *abscisses* les **pressions,** en *ordonnées* les **produits P. V.** Chacun de ces produits comporte une *incertitude,* due aux erreurs de mesures, qu'une étude plus approfondie peut évaluer à 30 unités environ; il devra être représenté sur le graphique par un petit segment de longueur 30 parallèle à l'axe des valeurs de P. V.

La figure 6, qui rassemble les résultats, montre qu'on peut faire passer à l'intérieur

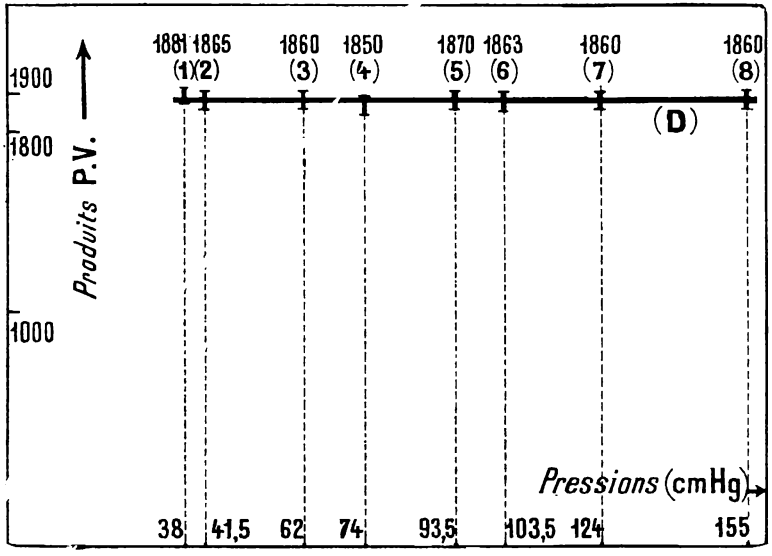

1881 1865 1860 1850 1870 1863 1860 1860
(1)(2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)
(D)
1900
1800
1000
Produits P.V.
Pressions (cmHg)
38 41,5 62 74 93,5 103,5 124 155

FIG. 6.

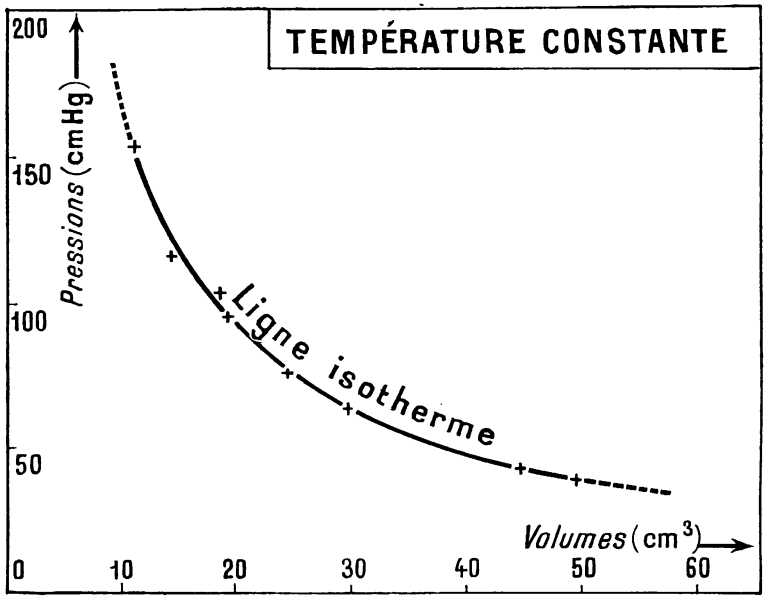

TEMPÉRATURE CONSTANTE
200
150
100
50
0
Pressions (cmHg)
Ligne isotherme
Volumes (cm³)
10 20 30 40 50 60

FIG. 7.

de tous les segments expérimentaux *une droite (D) parallèle à l'axe des pressions.* La représentation graphique conduit donc à la loi simple suivante :

Loi de Mariotte : *Pour une même masse de gaz, maintenue à température constante, le produit des nombres qui mesurent le volume et la pression est un nombre constant.*

$$P.V. = \text{constante.}$$

Application numérique. — *Une bouteille d'oxygène contient 15 l de gaz sous la pression de 150 atm. Quel volume occuperait ce gaz sous la pression atmosphérique, à la même température?*
Soit V_1 le nouveau volume; la loi de Mariotte permet d'écrire :

$$1 \times V_1 = 150 \times 15$$
$$V_1 = 150 \times 15 = 2\,250\ l.$$

3. AUTRE REPRÉSENTATION : COURBE ISOTHERME. — Si on désigne par ***K*** la constante égale au produit *P. V.* pour une masse donnée du gaz, maintenu à température fixe, on peut traduire la loi de Mariotte par :

$$P = \frac{K}{V}$$

ce qui s'énonce : *pour une masse de gaz, à température constante, la pression est inversement proportionnelle au volume.*

Dans une représentation graphique où les volumes sont portés en abscisses et les pressions en ordonnées la courbe figurative est celle d'une fonction $y = \frac{a}{x}$; c'est une branche *d'hyperbole équilatère.* Pour la construire point par point il suffit de reporter sur les axes les coordonnées (P, V) relevées dans le tableau des résultats expérimentaux. Le tracé de la figure 7 offre bien, pour la région explorée par les mesures, la forme habituelle d'un arc d'hyperbole. Toutefois, pour y reconnaître sans confusion possible une hyperbole il aurait fallu effectuer des expériences supplémentaires afin de préciser sa construction bien au delà du point le plus bas (région des pressions faibles et des grands volumes) et au delà du point le plus haut (pressions élevées, volumes faibles).

Cette courbe constitue en quelque sorte la solution du problème que nous avions posé : étude des variations simultanées des deux variables d'état P et V quand la troisième *t* reste fixe. Elle se nomme *courbe* ***isotherme*** [1]; ici c'est une isotherme à + 15 °C.

---

(1) Isotherme : étymologiquement : à même température.

4. CONSÉQUENCE : MASSE VOLUMIQUE D'UN GAZ ET PRESSION. — Soit m la masse d'un gaz, V son volume à la pression P. La masse volumique est :

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad [1]$$

Si la pression devient P', la température restant invariable, le volume devient V'. La masse m ne changeant pas, la masse volumique prend la nouvelle valeur

$$\rho' = \frac{m}{V'}. \qquad [2]$$

En divisant membre à membre [2] par [1] :

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{V}{V'};$$

et comme $\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P}$ (loi de Mariotte) :

$$\boxed{\frac{\rho'}{\rho} = \frac{P'}{P}.}$$

La masse volumique d'un gaz, maintenu à température constante, est proportionnelle à sa pression.

Exercice : *Quelle est la masse de l'oxygène, comprimé à* 150 *atmosphères, contenu dans une bouteille de* 50 *litres, à* 0 °C. *Masse de* 1 *litre d'oxygène, à* 0°, *sous pression atmosphérique normale* : 1,43 *g.*

Dans les conditions actuelles (150 atm., 0 °C) la masse volumique exprimée en g/l, est telle que :

$$\frac{\rho'}{1{,}43} = \frac{150}{1}.$$

D'où : $\rho' = 150 \times 1{,}43 = 214{,}5$ g/l.

La masse totale est donc : $m = 214{,}5 \times 50 = 10\,725$ grammes.

5. DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA LOI DE MARIOTTE. — Dans les expériences précédentes, le montage employé ne permet guère de faire croître la pression au-delà de 2 atm. Nous avons vu que dans ces limites, et aux erreurs d'expérience près, nous pouvons considérer comme exacte la loi $P \times V = c^{te}$. Mariotte avait, en 1650, expérimenté entre des pressions de 1/4 à 4 atm. à température ordinaire.

Des expériences précises ont montré que sous de fortes pressions les gaz ne suivent qu'approximativement la loi de Mariotte. En pratique cependant, nous pourrons toujours négliger les écarts, relativement faibles.

B. PRESSION CONSTANTE : LOI DE GAY-LUSSAC [1]

Nous avons déjà vu qu'un gaz, même légèrement chauffé, augmente très sensiblement de volume sous la pression atmosphérique. Dans une expérience plus précise, nous ferons varier régulièrement la température à l'aide de l'étuve de verre à chauffage électrique déjà employée.

6. EXPÉRIENCE. — Dans le tube gradué qui nous a servi à l'étude de la loi de Mariotte enfermons, sous la pression atmosphérique, de l'air dont la température nous sera donnée à chaque instant par un thermomètre placé dans le tube (fig. 8). Chauffons l'air *lentement*; ils se dilate, le niveau *a* du mercure s'abaisse. Maintenons fixe la pression en abaissant le réservoir R, *de façon que les niveaux* **a** *et* **r** *soient constamment dans le même plan horizontal*, et, cette importante précaution étant prise, notons le volume d'air qui correspond à chaque température.

A l'aide du tableau des nombres relevés, construisons la courbe représentative des variations du volume en fonction de la température (fig. 9). Les points, *bien alignés* si le chauffage a été lent et régulier, se placent sur une *droite;* d'où la conclusion :

L'augmentation de volume de l'air, sous pression constante, est proportionnelle à l'élévation de la température.

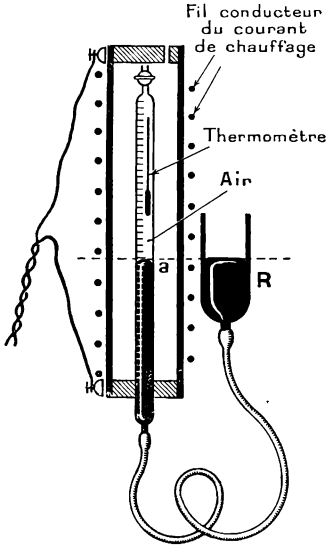


FIG. 8. — *A pression constante, le volume d'un gaz dépend de la température.*

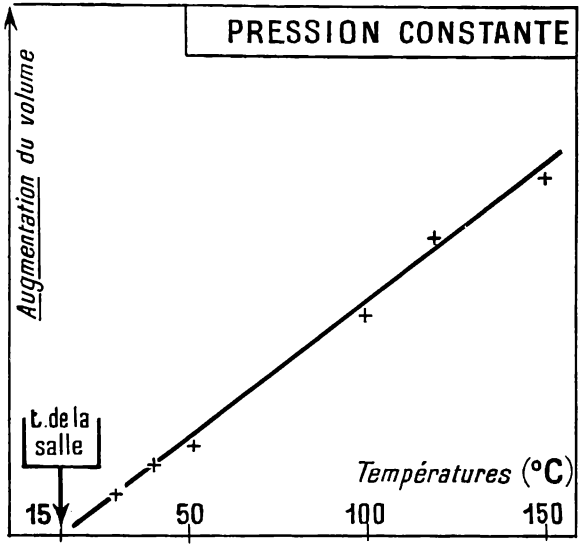


FIG. 9.

(1) GAY-LUSSAC (V. notice biographique).

Remarque. — En toute rigueur, nous avons étudié la dilatation *apparente* de l'air dans une enveloppe de verre. Mais nous remarquons que cette dilatation est *beaucoup plus considérable que celle des liquides*, déjà plus grande que celle des solides; par exemple nous constatons que, passant de + 15 °C à + 200 °C le volume passe de V à plus de 3/2 V; la dilatation de l'enveloppe est parfaitement négligeable devant l'importance du phénomène observé.

7. GÉNÉRALISATION : COEFFICIENT MOYEN DE DILATATION D'UN GAZ A PRESSION CONSTANTE. — La dilatation d'un gaz se fait comme celle des liquides. Par analogie, si V_0 est le volume à 0° occupé par un certain poids de gaz, V le volume à t°, l'augmentation de volume est :

$$V - V_0.$$

Par unité de volume initial elle est :

$$\frac{V - V_0}{V_0}$$

Par degré, cette dilatation relative est

$$\frac{V - V_0}{V_0 \cdot t}.$$

Définition : *On appelle coefficient moyen de dilatation d'un gaz sous pression constante entre les températures 0 °C et t °C le nombre :*

$$\alpha = \frac{V - V_0}{V_0 \cdot t}.$$

Le volume à t° est donc lié au volume à 0° par la relation

$$\boxed{V = V_0 (1 + \alpha t).}$$

C'est la *formule de la dilatation.*

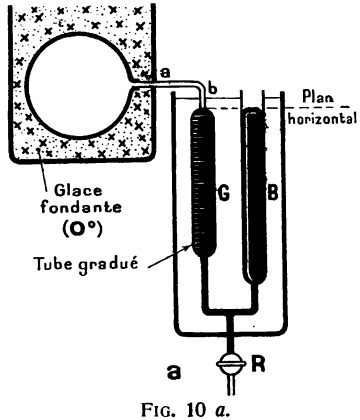


FIG. 10 *a.*

8. DESCRIPTION D'UNE MESURE PRÉCISE DE α : MÉTHODE HISTORIQUE DE REGNAULT. — REGNAULT [1] a déterminé le coefficient moyen a_0^{100} entre les températures 0 °C et 100 °C par la méthode suivante :

Un *ballon de verre* dont la capacité à 0° a été soigneusement déterminée (capacité voisine de 1 *l*) communique par un tube très fin **ab** avec un *tube gradué* G, branche d'un tube en U contenant du mercure, dont l'autre branche est B (fig. 10, *a*).

Le ballon étant placé dans la *glace fondante*, on le remplit de gaz de façon que le niveau du mercure affleure en *b* et soit au même niveau dans B; le gaz à 0° est donc à la pression atmosphérique.

(1) REGNAULT (V. notice biographique).

On remplace alors la glace fondante par de la vapeur d'*eau bouillante* (fig. 10, *b*). Le gaz se dilate et refoule le mercure vers le bas du tube gradué. En ouvrant le robinet R on laisse écouler une partie du mercure jusqu'au moment où les deux niveaux sont de nouveau dans le même plan horizontal.

L'augmentation de volume du gaz sous la pression atmosphérique est donc mesurée directement grâce à la graduation du tube G.

On connaît ainsi le volume initial à 0° : V_0, l'augmentation de volume : $V - V_0$, l'élévation de température : $t = 100$ °C.

En réalité, le volume gazeux extérieur à l'étuve n'est pas à 100°. Regnault en tenait compte dans les calculs. Pour cela il était nécessaire de connaître de façon précise la température du tube G; ce dernier, ainsi que B, était plongé dans l'eau dont un thermomètre donnait la température. Le volume intérieur du tube *ab* restait lui-même à la température du laboratoire mais il était assez faible pour être négligé. Enfin, on devait tenir compte de la dilatation du ballon de verre.

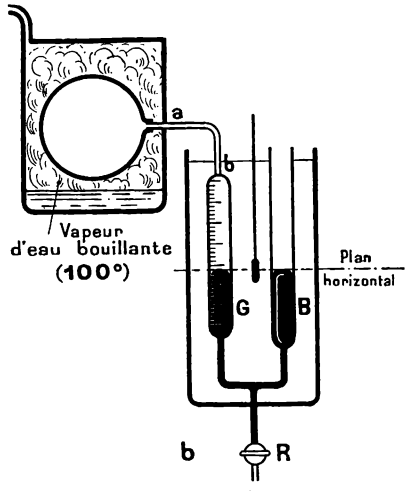


FIG. 10 *b*. *Mesure de* α *(Méthode de Regnault.*

9. LOI DE GAY-LUSSAC. LIGNE ISOBARE. — Les mesures de Regnault, reprises et perfectionnées, ont permis de déterminer le coefficient α pour de nombreux gaz, entre de très larges limites de températures et pour des pressions constantes couvrant une importante partie de la gamme des pressions. L'ensemble des résultats expérimentaux est traduit par la loi de GAY-LUSSAC [1].

Loi : *Le coefficient moyen de dilatation d'un gaz sous pression constante entre 0° C et t° C est :*

a) ***indépendant de la nature du gaz;***

b) ***indépendant de la température;***

c) ***indépendant de la pression.***

***Sa valeur*, la même pour tous les gaz, *est* :**

$$\alpha = \frac{1}{273} = 0{,}003\,663.$$

Donc

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

$\frac{1}{273}$ pour *tous* les gaz.

(1) La loi porte le nom de *Loi de Gay-Lussac*, car ce savant exécuta, avant Regnault, des mesures de α et reconnut que le coefficient était le même pour tous les gaz.

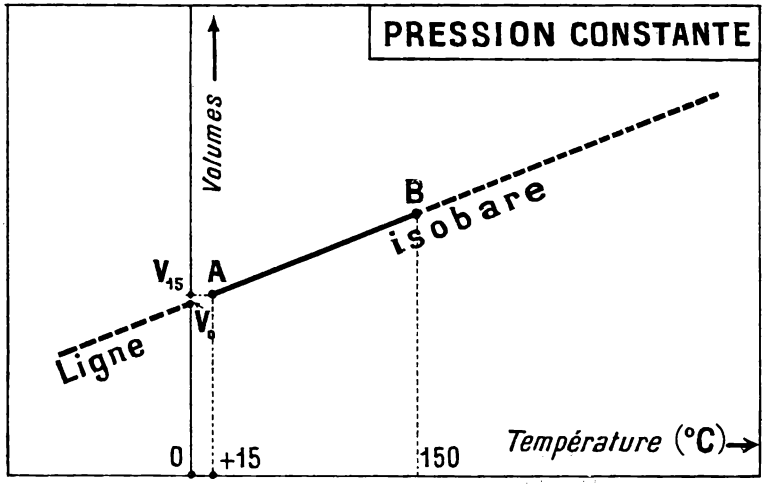


FIG. 11.

Puisque α est constant et le même pour tous les gaz la formule de Gay-Lussac : $V = V_0(1 + \alpha t)$, qu'on peut écrire :

$$V = V_0 + V_0.\alpha.t$$

reçoit une représentation graphique simple dans un système d'axes V (ordonnées) et t (abscisses) : c'est en effet une fonction *linéaire*. Sur la figure 11, les variations de V en fonction de t sont représentées par une droite d'ordonnée à l'origine V_0 (pour $t = 0$ °C) et de coefficient angulaire $V_0.\alpha$. C'est la portion AB de cette droite que l'expérience précédente permet de construire, pour l'*air*, à la pression constante du laboratoire. Pour donner à cette étude une portée beaucoup plus générale il faudrait effectuer des expériences vers les hautes et basses températures afin de prolonger le graphique *au delà de A et au delà de B*. La courbe (droite) qui traduit, à pression constante, les variations du volume en fonction de la température pour une même masse de gaz est une *ligne* ***isobare*** [1].

Application numérique. — *A quelle température faut-il porter un gaz, pris à 0°, pour doubler son volume à pression constante?*

$$2V_0 = V_0\left(1 + \frac{t}{273}\right)$$

$$t = 273 \text{ °C}.$$

Remarque. — La loi de Gay-Lussac n'est qu'*approchée*. Des mesures de plus en plus précises ont montré que le coefficient de dilatation sous pression constante n'est pas tout à fait indépendant de la nature du gaz, de la pression fixe à laquelle se fait la dilatation, et de l'écart de température (0°, t°) noté dans les expériences. Toutefois, pour les gaz *difficilement liquéfiables*, étudiés *sous faibles pressions*, la loi de Gay-Lussac représente les phénomènes avec une très bonne approximation.

(1) *Isobare* : étymologiquement : « *même poids* ». Signification en Physique : « *à même* ***pression*** ». Le mot a déjà été rencontré à propos des mesures barométriques.

C. VOLUME CONSTANT : LOI DE CHARLES [1]

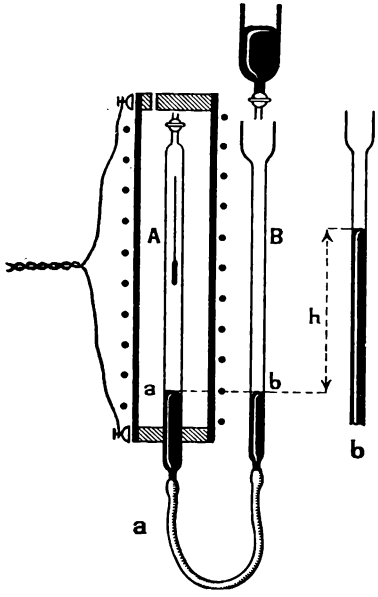


FIG. 12. — *A volume constant, la pression d'un gaz dépend de la température.*

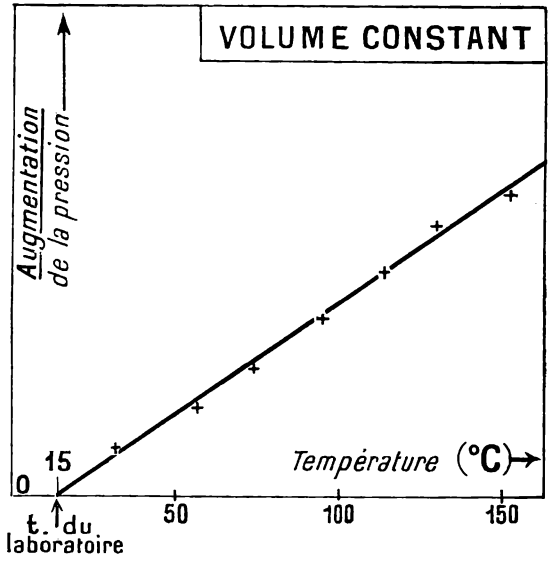


FIG. 13. — *A volume constant, l'augmentation de pression d'un gaz est proportionnelle à l'élévation de température.*

10. EXPÉRIENCE. — Enfermons dans le tube A déjà utilisé au paragraphe 6 un certain volume d'air sous la pression atmosphérique (fig. 12, *a*). Le tube est en relation avec une longue branche verticale B. A la température du laboratoire, les niveaux *a* et *b* sont sur le même plan horizontal.

Chauffons *très lentement* et régulièrement le gaz par le dispositif électrique déjà décrit; le niveau **a** descend pendant que **b** s'élève.

En ajoutant du mercure dans le tube *B*, ramenons le volume d'air à sa valeur initiale (mercure au niveau initial *a*). Nous observons alors une *dénivellation h* entre les deux niveaux mercuriels (fig. 12, *b*).

A chaque élévation de la température de l'air, indiquée par le thermomètre, correspond une augmentation de la pression mesurée par la hauteur *h*...

Le graphique de la figure 13 résume les observations. La courbe, *pratiquement assimilable à une droite*, nous conduit à la conclusion suivante :

L'augmentation de pression de l'air, à volume constant, est proportionnelle à l'élévation de la température.

(1) CHARLES (V. notice biographique).

11. GÉNÉRALISATION : COEFFICIENT MOYEN D'AUGMENTATION DE PRESSION A VOLUME CONSTANT. — Soi P_0 la pression d'un gaz à 0 °C, P la pression à t °C;

L'augmentation de pression est : $P - P_0$.

L'augmentation *relative* de la pression, par rapport à la pression P_0 est

$$\frac{P - P_0}{P_0}.$$

Par degré, l'augmentation relative moyenne est :

$$\frac{P - P_0}{P_0 \cdot t}.$$

Définition : *On appelle coefficient moyen d'augmentation de pression d'un gaz à volume constant, entre les températures 0 °C et t °C, le nombre :*

$$\beta = \frac{P - P_0}{P_0 \cdot t}.$$

La pression à t^o s'exprimera, en fonction de la pression à 0° et de la température, par la relation :

$$\boxed{P = P_0(1 + \beta t).}$$

12. MESURE PRÉCISE DE β. MÉTHODE DE REGNAULT. — Regnault utilisait un appareil analogue à celui de la figure 14.

Les deux tubes A et B formaient les deux branches d'un manomètre à mercure à air libre.

Le ballon était rempli de gaz *à la température* 0 °C, sous la pression initiale P_0, par exemple sous la pression atmosphérique : dans ce cas, le mercure montait au même niveau dans les deux branches du manomètre (fig. 14, *a*).

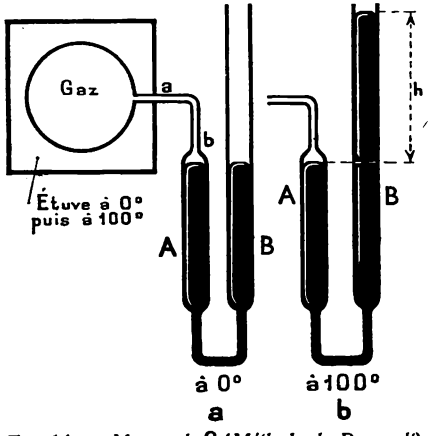


FIG. 14. — *Mesure de β (Méthode de Regnault).*

On portait le gaz *à 100°*, dans la vapeur d'eau bouillante. Pour conserver le volume constant, on devait ajouter du mercure dans la branche B (fig. 14, *b*).

L'accroissement de la pressoin était mesuré par la hauteur *h*.

Le volume *ab*, environ 1/1 000 du volume du ballon, n'intervenait que pour de faibles corrections.

13. LOI DE CHARLES. LIGNE ISOCHORE. Répétées avec un soin particulier, en faisant varier les conditions expérimentales (pression initiale de remplissage du réservoir, écarts de température), les mesures du coefficient β ont donné les résultats suivants, résumés dans la loi de CHARLES.

Loi : *Le coefficient moyen d'augmentation de pression d'un gaz, à volume constant entre 0° C et t °C, est :*

a) ***indépendant de la nature du gaz;***
b) ***indépendant de la température;***
c) ***indépendant de la pression initiale.***

Sa valeur*, la même pour tous les gaz, *est : $\beta = \frac{1}{273}$.

Par suite la traduction de la loi de Charles est :

$$P = P_0(1 + \beta t)$$

$\frac{1}{273}$ pour *tous* les gaz

Les variations de P en fonction de t sont représentées par une *droite* d'ordonnée à l'origine P_0 et de coefficient angulaire $P_0.\beta$. (fig. 15). On donne à ce graphique le nom de *ligne* ***isochore*** [1].

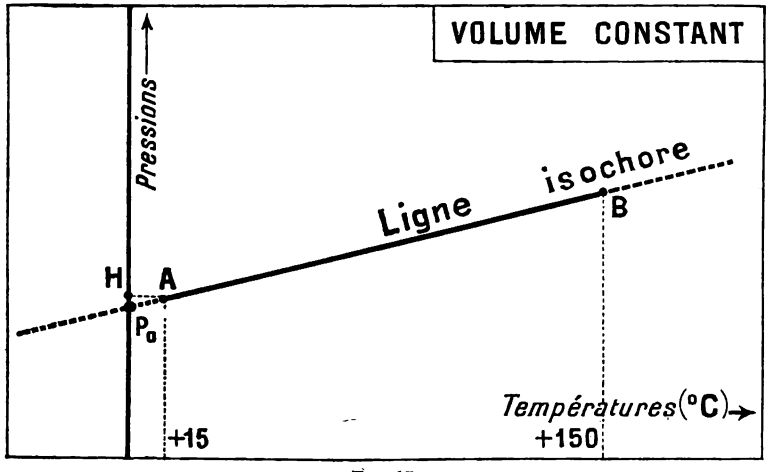


FIG. 15.

Application. — *Un gaz passe, à volume constant, de 0 °C à 273 °C. Que devient sa pression*

La pression a *doublé* de valeur : $P = P_0\left(1 + \frac{273}{273}\right) = 2\,P_0$.

Remarques :

1. La loi de Charles n'est qu'*approchée*. Des mesures précises ont montré que le coefficient β dépend en réalité légèrement de la pression initiale, de la température et de la nature du gaz; ces variations sont toutefois assez faibles pour pouvoir être négligées quand on ne recherche pas une très grande précision.

Pratiquement, pour des gaz *loin de leurs conditions de liquéfaction*, et tant que la pression reste *faible*, la loi de Charles représente bien les phénomènes.

(1) *Isochore :* étymologiquement : *iso*, égal; *chôra*, espace.

II. $\alpha = \beta$. On ne manque pas d'être frappé de la valeur numérique *identique* des coefficients α et β. Cette coïncidence n'est pas due au hasard; elle sera expliquée bientôt.

EXERCICES

1. Une pompe à bicyclette a une section intérieure de 4 cm²; la course du piston est 40 cm. La pompe est remplie d'air à la pression atmosphérique de 75 cm de mercure. Quelle force faut-il appliquer sur le piston pour le maintenir enfoncé de 25 cm la température restant constante?
Rép. : 6,58 kgf.

2. Une éprouvette retournée sur la cuve à mercure contient 50 cm³ d'air, à 0°. Le mercure s'élève de 5 cm dans l'éprouvette. Quelle est la masse de l'air? (masse du litre d'air dans les conditions normales 1,3 g. Pression atmosphérique : 74 cm de mercure). Rép. : 0,060 g.

3. Un tube de Torricelli, de longueur égale à 1 m, de section 1 cm², est rempli de mercure jusqu'à une hauteur de 75 cm au-dessus du mercure d'une cuve large. On introduit un peu d'air dans la chambre barométrique et le niveau du mercure descend de 10 cm. Quel volume d'air, pris dans l'atmosphère, a-t-on introduit dans le tube?
Rép. : 4,67 cm³.

4. Une certaine masse de gaz enfermée dans un cylindre vertical supporte un piston glissant sans frottement dans le corps de pompe et pesant 200 gf. Quelle est en centimètres carrés la section du cylindre sachant que le volume du gaz diminue de 1/3 de sa valeur primitive quand on ajoute 6 kg sur le piston, la température restant constante. Pression atmosphérique : 760 mm de mercure.
Rép. : 11,4 cm².

5. Un gaz occupe 3 m³ à 50 °C. Quel est son volume quand on le porte à 200 °C sous pression constante?

6. Un gaz est à 0 °C. A quelle température faut-il le porter, sous pression constante, pour que son volume augmente de 1/10 de la valeur initiale?
Même question, le gaz étant initialement à 100 °C? Rép. : 27,3 °C; 137,3 °C.

7. Quelle est la variation relative de la masse volumique de l'air quand la température passe de 0 °C à 1 °C. Ce résultat est-il le même pour l'hydrogène, l'azote?... Rép. : $\frac{1}{273}$; oui.

8. Une goutte de mercure sert de piston mobile dans un tube de verre, de section 2 mm², contenant de l'air dont le volume est 10 cm³ à 0 °C. Sachant qu'on peut apprécier un déplacement de 1/2 de mm de l'index de mercure, quelle est la plus petite variation de température que peut déceler cet appareil au voisinage de 0 °C? Rép. : 0,027 °C.

9. L'enveloppe d'une montgolfière sphérique, en papier, a 3 m de rayon et pèse 11,3 kgf. Quelle doit être la température de l'air chaud qu'elle contient pour qu'elle puisse s'élever dans l'air à 0 °C? (La pression atmosphérique est 76 cm de mercure.)

10. Un gaz étant enfermé à 0 °C et sous la pression de une atmosphère dans un récipient indéformable, on le porte à 100 °C, 200 °C. Que devient la pression? Rép. : 1,37 atm; 1,73 atm.

11. Quelle est la variation relative de la pression dans une bouteille de gaz comprimé, entre la température — 10 °C (hiver) et + 40 °C (été), rapportée à la pression à 0 °C? Rép. : 18 %.

12. Un ballon de 2 l, fermé par un bouchon de 1 cm de rayon renferme 2 g d'air à 0 °C. On le chauffe à 400 °C et le bouchon saute à cette température. Quelle est la force qui l'a expulsé? Pression atmosphérique : 76 cm de mercure.
Rép. : F ≃ 3 kgf.

PROBLÈMES

1. Dans une salle à température constante 0 °C, un tube de Torricelli cylindrique, de section intérieure 1 cm², est disposé verticalement sur une cuve à mercure très large et très profonde. Le point le plus haut du tube et le niveau du mercure dans le tube sont respectivement à 1 mètre et 0,75 mètre du niveau du mercure dans la cuve. Quand on enfonce verticalement le tube, de 14,5 cm, on observe que le niveau du mercure intérieur baisse de 2 centimètres.

1° Montrer que cette expérience prouve la présence d'air dans la chambre barométrique.

2° Quelle est la pression atmosphérique au moment de l'expérience?

3° Calculer la masse de l'air contenu dans la chambre barométrique.

4° Désignant par l la longueur de la colonne d'air et par h la hauteur du mercure dans le tube au-dessus du niveau de la cuve, établir une relation entre l et h. Tracer la courbe représentant les variations de l (ordonnées) en fonction de h (abscisses). Limiter, sur ce

graphique, la portion correspondant à l'enfoncement du tube entre sa position initiale (sommet à 1 mètre du mercure de la cuve) et la position finale pour laquelle le sommet atteint la surface du mercure dans la cuve.

Les pressions seront exprimées en centimètres de mercure, les longueurs en centimètres. Masse volumique de l'air, aux conditions normales : 1,293 mg/cm³

2. Toutes les expériences ci-après ont lieu à température constante.

Un cylindre vertical AB a 40 cm de longueur et 10 cm² de section intérieure; il contient un piston hermétique C glissant sans frottement, d'épaisseur négligeable et de poids égal à 5 kgf; les deux fonds du cylindre sont munis de robinets.

On prendra la pression atmosphérique égale à 1 kgf/cm² et la masse du litre d'air sous cette pression égale à 1,3 g.

1° Le piston C étant d'abord maintenu au milieu et les robinets étant ouverts à l'air libre, on ferme le robinet *inférieur* et on laisse descendre le piston : calculer son déplacement x.

2° Partant du même état initial que précédemment (piston au milieu de la hauteur, robinets ouverts), on ferme *les deux robinets* puis on laisse descendre le piston : calculer son déplacement.

3° Dans l'une ou l'autre des deux expériences précédentes on ramène le piston à sa position primitive en insufflant de l'air par le robinet inférieur. Quelle masse d'air a-t-on introduit?

3. Un tube AB cylindrique, horizontal, de section intérieure faible, de longueur 65 cm, fermé en A, contient une colonne de mercure MN, de longueur 25 cm, qui emprisonne une colonne d'hydrogène de longueur AM égale à 20 cm à la température 0 °C (figure).

1° A 0 °C, on place le tube en position verticale, A en bas; la longueur de la colonne d'hydrogène diminue de 5 cm. Quelle est la pression atmosphérique?

2° A 0 °C, on incline le tube à 45° par rapport à la verticale, B en bas. Quelle est la nouvelle longueur de AM?

3° A 0 °C, le tube étant horizontal, on ferme l'extrémité B. Après cette opération AM est toujours égal à 20 cm; NB contient de l'air. On place alors le tube en position verticale, A en bas. On demande :

a) la nouvelle longueur AM?

b) la pression de l'hydrogène?

c) la pression de l'air dans la colonne NB?

4° Le tube fermé aux deux extrémités restant dans la position verticale A en bas et la colonne NB à 0 °C, à quelle température faudrait-il porter l'hydrogène seul pour qu'il reprenne son volume initial : $AM = 20$ cm?

5° Quelles sont les masses d'hydrogène et d'air enfermées dans le tube? (section intérieure du tube : 4 mm²)?

4. Un tube en U, de section constante égale à 2 cm², fermé à une de ses extrémités, est placé dans une salle à température fixe : + 15 °C. Il contient du mercure qui s'élève au même niveau dans les deux branches emprisonnant dans la branche fermée une colonne d'air de longueur 20 cm.

1° On verse du mercure dans la branche ouverte; la longueur de la colonne d'air devient égale à 15 cm. Quel poids de mercure a été ajouté?

2° On chauffe alors l'air lentement, en maintenant constante la dénivellation du mercure entre les deux branches. Que doit-on faire pour cela? A quelle température l'air reprend-il son volume initial?

3° Le tube étant ramené et maintenu à + 15 °C avec du mercure au même niveau dans les deux branches, on verse 100 cm³ de mercure dans la branche ouverte. Calculer la nouvelle longueur de la colonne d'air.

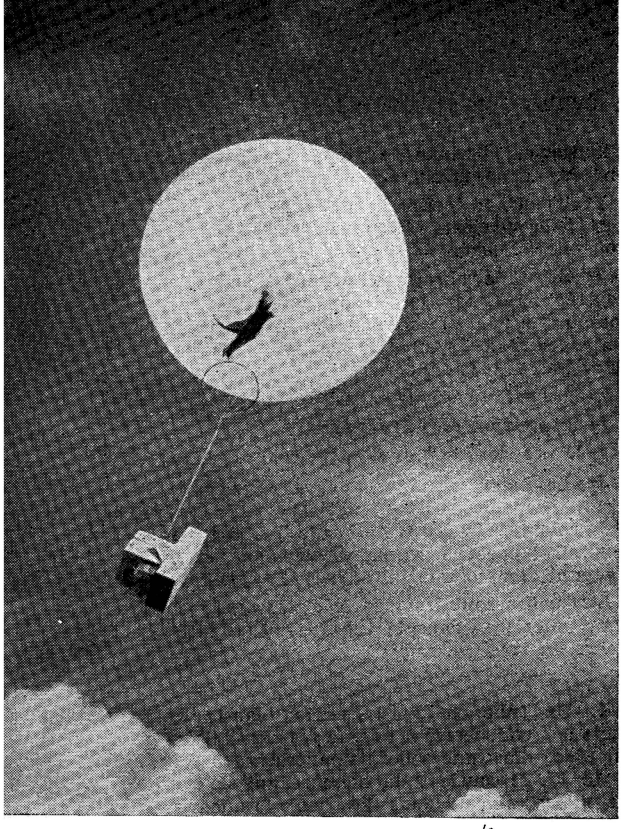
Poids volumique du mercure à + 15 °C : 13,6 gf/cm³.

Pression atmosphérique pendant les expériences : 75 cm de mercure.

TRAVAUX PRATIQUES

N° 21. Loi de Mariotte.

N° 22. Dilatation de l'air sous pression constante.



Archives Photographiques de la Météorologie N^le.

FIG. 1. — ***Départ d'un ballon-sonde.*** *Gonflé d'hydrogène un ballon-sonde va s'élever dans l'atmosphère. Pendant l'ascension les trois variables définissant son état (pression, volume, température) seront à chaque instant modifiées simultanément. Comme la masse du gaz est constante, **P, V, T** restent liés par l'équation caractéristique des gaz parfaits.*

22. LE GAZ PARFAIT. ÉQUATION CARACTÉRISTIQUE

A. LE GAZ PARFAIT

1. QU'APPELLE-T-ON GAZ PARFAIT ? — Nous avons signalé que les gaz ordinaires ne suivent pas rigoureusement les lois de MARIOTTE, GAY-LUSSAC et CHARLES. Pour ces deux dernières lois, reproduisons, à titre documentaire, quelques résultats des mesures de α relatifs à un gaz commun, le gaz carbonique; ce sont des valeurs du coefficient *moyen* α_0 entre les températures 0 °C et t °C.

Valeurs de α

PRESSION INITIALE	$\alpha_0^{10°}$	$\alpha_0^{50°}$	$\alpha_0^{100°}$	$\alpha_0^{200°}$	$\alpha_0^{250°}$
1 atm . .		0,003714	0,003710	0,003704	***0,003703***
2,75 — .			0,00371		
5,7 — . .			0,0040		
50 — . .	0,00905				
200 — . .	0,00416				
1 000 — . .	0,00175				

← valeur la plus voisine de $\alpha = \frac{1}{273}$

La valeur $\alpha = \frac{1}{273} = 0{,}003663$ n'est donc atteinte dans aucune de ces mesures. Cependant, les résultats qui s'en rapprochent le plus sont ceux qu'indique le tableau à droite et en haut (0,003703). Ils correspondent aux conditions expérimentales suivantes : *faible pression, température élevée.* Ce résultat est général : Un gaz pris sous des pressions de plus en plus faibles, et à des températures de plus en plus élevées se rapproche de plus en plus d'un état *idéal* appelé : *gaz parfait.*

Définition : *Un gaz parfait suivrait rigoureusement les lois de Mariotte, Gay-Lussac et Charles.*

Aucun gaz n'est parfait. Par opposition, on dit que les gaz manipulés et étudiés par les Physiciens sont des ***gaz réels.*** **L'état parfait est un état « idéal » qu'on peut concevoir, mais non réaliser. Cependant, comme nous verrons qu'une forte pression et une basse température provoquent le passage de l'état gazeux à l'état liquide, nous pourrons dire légitimement : *Un gaz se rapproche d'autant plus de l'état parfait qu'il est plus éloigné de ses conditions de liquéfaction.***

Dans les circonstances habituelles (pression pouvant atteindre quelques atmosphères, température voisine de la température ordinaire), certains gaz usuels sont très proches de l'état parfait. Citons par exemple :

Hélium
Hydrogène
Oxygène } et leur mélange : *Air*
Azote }
. . . . . .

Le *gaz carbonique*, l'*anhydride sulfureux*, le *chlore*... commencent à s'en écarter notablement. Mais, quand on ne cherche pas une très grande précision, les lois précédentes leur sont assez bien applicables. C'est pourquoi, dans ce qui suivra, nous traiterons les gaz réels comme s'ils étaient « parfaits ».

2. ÉGALITÉ DES COEFFICIENTS α et β. — Considérons une certaine masse d'un gaz parfait dans les conditions suivantes :

température : 0 °C; *volume* : V_0; *pression* : P_0. [état (1)]

Portons ce gaz à la température t °C. Nous pouvons choisir plusieurs chemins différents parmi lesquels :

***a)* à pression constante** il atteint un nouvel état défini par

température : t °C; *volume* : $V_0(1 + \alpha t)$; *pression* : P_0 [état (2)]

***b)* à volume constant** il atteint un autre état :

température : t °C; *volume* : V_0; *pression* : $P_0(1 + \beta t)$ [état (3)]

Les états (2) et (3), pour lesquels la température est la même, permettent d'appliquer au gaz la loi de Mariotte :

$$P_0 . V_0 (1 + \alpha t) = P_0 (1 + \beta t) . V_0$$

d'où on déduit, en simplifiant :

$$\boxed{\alpha = \beta.}$$

Ce résultat, obtenu en respectant les lois de *Mariotte*, *Gay-Lussac* et *Charles*, est bien une conséquence de la définition du gaz parfait.

3. QUE REPRÉSENTE LA PRESSION D'UN GAZ PARFAIT? DÉFINITION DE LA TEMPÉRATURE ABSOLUE.

1. PRESSION ET AGITATION THERMIQUE. — Ce que nous désignons par « *pression* » dans un *fluide* n'est autre chose que le résultat mécanique des chocs moléculaires du fluide contre une paroi qui s'y trouve placée. Celle-ci, qui enregistre en même temps une multitude d'impulsions, subit des effets comparables à ceux d'une force. D'autre part l'agitation des molécules dépend beaucoup de la température, les vitesses augmentant quand la température s'élève, diminuant quand elle s'abaisse. En somme, pression et température sont deux grandeurs liées à un même phénomène : l'*agitation des particules de la matière qui constitue un gaz.*

2. LE ZÉRO ABSOLU. — Soit une masse d'un gaz parfait dont, à volume constant, nous abaissons la température. La loi de CHARLES régit les variations de la pression (courbe *isochore*). La fonction [1] : $P = P_0 + P_0 \beta t$ qui traduit cette loi est de la forme

$$y = b + ax.$$

Elle peut être représentée graphiquement par une droite (fig. 2); une partie AB de cette droite a été tracée, expérimentalement, au paragraphe 13, leçon 21.

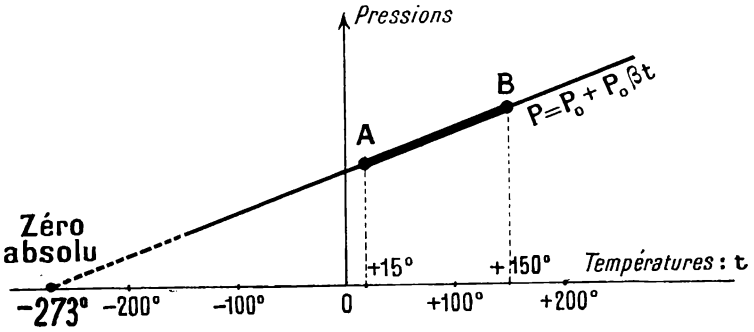


FIG. 2. — *Le zéro absolu fixe aux temperatures une* ***limite*** *théorique.*

Prolongée, cette droite couperait l'axe des températures en un point tel que $P = 0$, ce qui entraine, d'après [1] :

$$0 = P_0(1 + \beta t).$$

Comme P_0 n'est pas nul,

$$1 + \beta t = 0$$

ou :

$$\boxed{t = -\frac{1}{\beta} = -273\ ^{\circ}C.}$$

Interprétons :

Tout gaz parfait refroidi suffisamment à volume constant suivrait une droite analogue et atteindrait une *pression nulle* à la température de — 273 °C, quelles que soient les conditions initiales. Pour une température inférieure à — 273 °C, on aurait une pression *négative*, ce qui n'a aucun sens.

***— 273 °C est donc la température la plus basse qu'on puisse concevoir; elle correspondrait à l'immobilité totale des molécules du gaz; on l'appelle le* zéro absolu.**

Remarque. — Le zéro absolu est ainsi défini d'une manière tout à fait *théorique*, comme une température limite qu'on peut *approcher, mais non atteindre*, puisqu'en fait on ne peut expérimenter que sur des gaz réels. C'est pourquoi nous avons, sur la figure 2, tracé en pointillé la portion de droite voisine de — 273°. En étudiant l'*hélium* (gaz qui existe en très faibles proportions dans l'air), on a réussi à atteindre le domaine des températures inférieures à — 272 °C. Des recherches de ce genre ont d'ailleurs permis de déterminer la valeur exacte des coefficients α et β correspondant à l'état parfait. On admet $\alpha = \beta = 0{,}0036610$ ou 1/273,15.

Température absolue. — On peut prendre le zéro absolu, ce « pôle du froid », comme origine naturelle des températures; on définit ainsi la *température absolue.* ***La température absolue T est égale à la température Celsius augmentée de 273° :***

$$\boxed{T^{\circ}_{\text{absolue}} = \underset{\text{Celsius}}{t^{\circ}} + 273.}$$

L'échelle absolue est donc un *décalage* de l'échelle centésimale; toute température absolue est évidemment *positive*. Pour ne pas confondre température absolue et température Celsius, on fait suivre le nombre de degrés exprimés dans l'échelle absolue de la lettre K (1).

Ainsi : $+ 100\,^{o}C = 373^{o}\ K.$

La définition de l'échelle absolue apporte un fait nouveau d'une grande importance. On sait maintenant définir une température *nulle* de référence; la température n'est plus seulement une grandeur repérable; exprimée dans l'échelle absolue, elle peut devenir une *grandeur mesurable*.

De plus, si, dans la relation de CHARLES on remplace la température *Celsius* t par la température *absolue* T qui lui correspond suivant $t = T - 273$, on obtient :

$$P = P_0\left[1 + \frac{1}{273}(T - 273)\right] = P_0 \cdot \frac{T}{273}$$

soit

$$P = \frac{P_0}{273} . T.$$

Pour une masse déterminée de gaz parfait $\frac{P_0}{273}$ est fixé par les conditions initiales. On voit maintenant que P et T sont proportionnels. La température absolue, comme la pression, figure, numériquement, l'état d'agitation des molécules d'un gaz parfait.

B. ÉQUATION CARACTÉRISTIQUE

4. FORMULE DE MARIOTTE-GAY-LUSSAC. — Considérons une certaine masse de gaz parfait, dans deux états différents, caractérisés par les valeurs des trois variables :

$$P,\ V,\ t \qquad \text{(état (1))}$$
$$P',\ V',\ t' \qquad \text{(état (2))}$$

Cherchons à établir une relation entre P, V, t, P', V', t'.

Passons, à *pression constante*, de l'état (1) à un état où la température est 0 °C

le volume devient : $V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t}$ (loi de Gay-Lussac) et la pression reste P.

Passons, à *pression constante*, de l'état (2) à un état où la température est 0° C :

le volume devient : $V'_0 = \frac{V'}{1 + \alpha t'}$; la pression reste P'.

---

(1) Initiale de LORD KELVIN (V. notice biographique).

A 0 °C, les pressions P et P′ et les volumes V_0 et V'_0 de la même masse de gaz sont liés par la loi de Mariotte

$$PV_0 = P'V'_0$$

ou

$$\boxed{\frac{PV}{1+\alpha t} = \frac{P'V'}{1+\alpha t'}.} \qquad [1]$$

Cette relation montre qu'un état initial étant déterminé par les valeurs numériques des trois variables P, V, t, il est possible de déterminer pour la même masse de gaz, dans un deuxième état, une des trois variables P′, V′, t' connaissant les deux autres. Elle est nommée *formule de Mariotte-Gay-Lussac* ou *équation caractéristique des gaz parfaits.*

Application numérique. — *Un ballon d'enfant contient 4 l d'air sous la pression atmosphérique normale à 27 °C. On le porte au soleil : la température devient 54 °C et le volume 4,1 l. Quelle est la pression dans le ballon?* Appliquons l'équation caractéristique :

$$\frac{1 \times 4}{1+\frac{27}{273}} = \frac{P' \times 4{,}1}{1+\frac{54}{273}}$$

$$\frac{4}{1{,}1} = \frac{P' \times 4{,}1}{1{,}2}$$

$$P' = \frac{4 \times 1{,}2}{1{,}1 \times 4{,}1} = \frac{4{,}8}{4{,}51} = 1{,}06 \text{ atm.}$$

Comme le volume a légèrement augmenté, malgré la différence de température qui nous semble appréciable, la pression a peu changé.

Remarque. — Si un des états envisagés correspond à la température centésimale 0 °C l'équation caractéristique devient

$$\boxed{P_0V_0 = \frac{PV}{1+\alpha t}.} \qquad [2]$$

5. FORME GÉNÉRALE. — Dans la relation [1] introduisons les températures absolues : $T = 273 + t$ et $T' = 273 + t'$. Il vient :

$$1 + \alpha t = 1 + \frac{t}{273} = \frac{T}{273}; \quad \text{de même} \quad 1 + \alpha t' = \frac{T'}{273}$$

La relation [1] s'écrit donc :

$$\frac{P.V}{\frac{T}{273}} = \frac{P'.V'}{\frac{T'}{273}}$$

soit :

$$\frac{P.V}{T} = \frac{P'.V'}{T'}.$$

Conclusion : *Quand une même masse de gaz parfait passe par plusieurs états les trois variables* ***pression, volume, température absolue*** *peuvent subir des changements simultanés. Elles restent liées par la condition :*

$$\frac{P.V}{T} = \frac{P'.V'}{T'} = \frac{P''.V''}{T''} \ldots = \textbf{constante.}$$

On dit que le produit $\frac{P.V}{T}$ *est, pour cette masse de gaz, un* ***invariant.*** Les trois lois des gaz parfaits peuvent donc se résumer simplement :

$$\frac{P.V}{T} \text{ invariant pour une même masse de gaz} \qquad [3]$$

Nous comprenons mieux maintenant le résultat de l'exercice numérique précédent. Une élévation de température de + 27 °C à + 54 °C nous paraît importante, car elle se produit dans un domaine où nous sommes très sensibles aux modifications des propriétés du milieu ambiant; mais si nous l'exprimons en températures *absolues* (+ 27 °C = 300 °K; + 54 ° C = 327 °K), ces températures présentent une *variation relative* assez faible. La relation [3] montre bien que si V et T varient *peu* et dans le même sens, la variation de la pression P est *peu* importante.

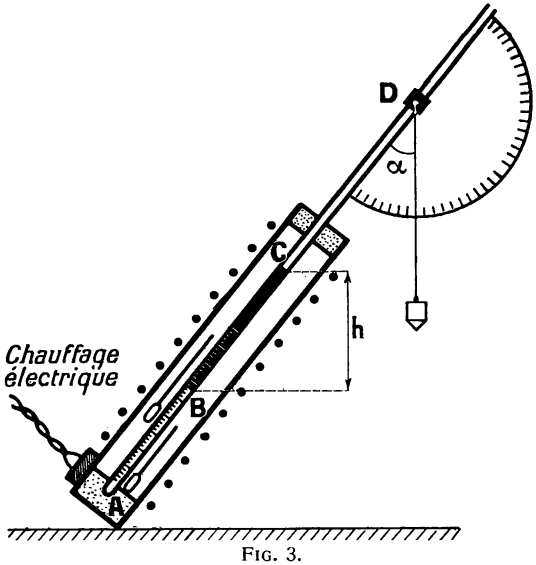


FIG. 3.

6. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE. — La figure 3 décrit un montage simple permettant de vérifier la relation caractéristique des gaz parfaits.

Un tube rectiligne gradué ***AD*** en verre épais (longueur totale : 1 mètre environ) muni d'un canal *cylindrique* étroit (section ***s*** de l'ordre de 1 à 2 mm²) est fermé à son extrémité *A*. De *A* à *B* il contient une colonne d'air (longueur ***l*** de 30 à 40 cm) et, de *B* en *C*, une colonne de mercure (longueur ***a*** de 30 à 40 cm). Grâce à une étuve électrique la masse d'air peut être portée à différentes températures ***t*** (entre la température ambiante et 200 °C par exemple) repérées en prenant les moyennes des indications de deux thermomètres.

Pour une température et une inclinaison du tube, le volume de l'air est ***s.l*** (***l*** lue directement). La pression est mesurée par une colonne de mercure de hauteur ***h*** augmentée de la pression atmosphérique du moment *H*. Pour connaître ***h*** avec une assez bonne précision on

peut, avec un rapporteur et un fil à plomb fixés au tube, mesurer l'angle α. On a alors : $h = a.\cos\alpha$. Le pression est par suite : $P = H + a\cos\alpha$ (1).

L'invariant $I = \frac{P.V}{T}$ s'exprime donc, la pression étant mesurée en hauteur de mercure :

$$I = \frac{[H + a.\cos\alpha][s.l]}{273 + t}.$$

Comme s est une constante de l'appareil, il suffit, en donnant à α et à t différentes valeurs, de vérifier que

$$\frac{[H + a\cos\alpha].l}{273 + t} \text{ est constant.}$$

C'est ce que montre l'expérience à 3 ou 5 % près.

C. APPLICATIONS

7. MASSE VOLUMIQUE DES GAZ. — Si une masse m de gaz occupe un volume V, sa masse volumique est :

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Mais le volume V dépend de la pression et de la température; la *masse volumique* d'un gaz dépend donc de la *pression* et de la *température* de ce gaz.

Comparons deux masses volumiques ρ et ρ' d'un même gaz qui se trouve successivement dans les deux états : P, V, T et P', V', T'... Si m est la masse de ce gaz,

$$\rho = \frac{m}{V}; \qquad \rho' = \frac{m}{V'};$$

d'où :

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{V'}{V}.$$

Mais l'équation caractéristique s'écrit dans les deux cas (r étant une constante).

$$PV = rT$$
$$P'V' = rT'$$

d'où

$$\frac{V'}{V} = \frac{P}{P'} \times \frac{T'}{T}$$

et

$$\boxed{\frac{\rho}{\rho'} = \frac{P}{P'} \times \frac{T'}{T}.}$$

La masse volumique est *proportionnelle à la pression et inversement proportionnelle à la température absolue.*

(1) En plaçant l'appareil de façon que A soit *plus haut* que D on obtient : $P = H - a\cos\alpha$.

Exemple. — Calculons la masse volumique de l'air sous 4 atm et à la température de 100 °C, sachant que la masse volumique dans les conditions normales est $a_{0,76} = 0{,}0013$ g/cm³ :

$$\frac{a}{0{,}0013} = \frac{4}{1} \times \frac{273}{373}$$

$$a = 0{,}0040 \text{ g/cm}^3.$$

A pression constante (pression atmosphérique par exemple), l'air chaud, moins dense que l'air froid, s'élève. On sait qu'il fut utilisé dans les montgolfières; dans une pièce close, l'air chaud se localise vers le plafond, l'air froid reste vers le plancher.

8. DENSITÉ DES GAZ. — Rappelons la définition de la densité d'un gaz :

$$\text{Densité} = \frac{\text{masse d'un } \textit{certain volume} \text{ du gaz}}{\text{masse du } \textit{même volume} \text{ d'air}} \quad \left[\begin{array}{c}\text{ces deux volumes}\\ \textbf{étant mesurés}\\ \text{dans les mêmes conditions}\\ \text{de température et de pression}\end{array}\right]$$

Soit donc une masse m_g de gaz occupant le volume V_g sous la pression P et la température absolue T.

Soit la masse m_a d'air qui occupe le même volume ($V_a = V_g$) dans les mêmes conditions.

La densité du gaz est le rapport :

$$d = \frac{m_g}{m_a}.$$

Si les conditions de mesure deviennent P′ et T′, on aura, pour l'air :

$$P'V'_a = rT',$$

et pour le gaz :

$$P'V'_g = rT'$$

d'où

$$V'_a = V'_g.$$

Les volumes sont modifiés mais *restent égaux entre eux*; la densité est toujours

$$d = \frac{m_g}{m_a}.$$

Elle n'a pas varié.

La densité d'un gaz ne dépend pas des conditions de pression et de température; c'est donc une caractéristique de chaque gaz considéré.

On a appris en Chimie que toutes les *molécules-grammes*, à l'état gazeux et dans les conditions normales, occupent le même volume moléculaire : 22,4 l. Exprimons la densité d'un gaz quelconque par le rapport de sa masse molaire M à la masse de 22,4 l d'air pris dans les conditions normales :

$$d = \frac{\text{M (masse molaire)}}{\text{masse de 22,4 l d'air (conditions normales)}}$$

$$d = \frac{M}{1{,}293 \times 22{,}4} = \frac{M}{29}$$

d'où :

$$\boxed{M \simeq 29 \times d.}$$

grammes

C'est la ***formule d'Avogadro-Ampère*** [1] très utile en Chimie.

9. MASSE D'UN VOLUME GAZEUX MESURÉ DANS DES CONDITIONS PARTICULIÈRES DE PRESSION ET DE TEMPÉRATURE.

Problème. — *Un volume* ***V*** *d'un gaz, de densité* ***d****, est mesuré sous la pression* P_e *(pression effective en millimètres de mercure normal) et à la température* ***t*** °C. *Calculer sa masse, sachant que la masse volumique de l'air (conditions normales) est* $a_{0,76}$.

Soit $V_{0,76}$ le volume qu'occuperait le gaz s'il était mesuré dans les conditions normales; la masse m s'en déduit par :

$$m = a_{0,76} . d . V_{0,76}.$$

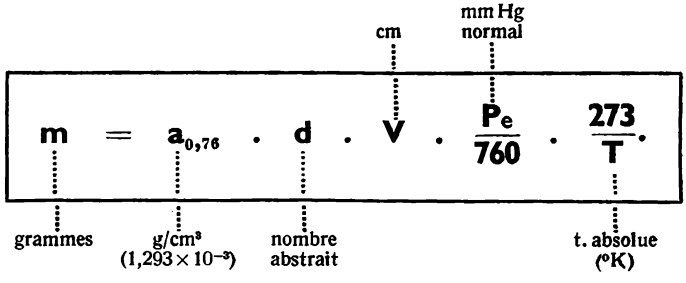
Or les conditions *actuelles* (P_e, V, T) et les conditions *normales* (760 mmHg, $V_{0,76}$ 273) obéissent à la relation :

$$\frac{P_e . V}{T} = \frac{760 . V_{0,76}}{273}$$

d'où l'on tire :

$$V_{0,76} = V . \frac{P_e}{760} . \frac{273}{T}.$$

La masse cherchée est donc, en indiquant les unités les plus souvent employées



(1) AVOGADRO-AMPÈRE (V. notice biographique).

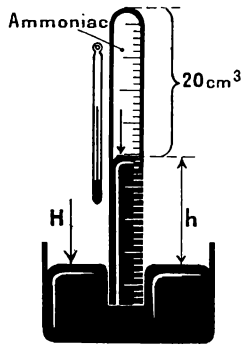


FIG. 4.

Application numérique. — *Calculer la masse de 20 cm³ d'ammoniac sec (formule : NH_3) mesurés sur la cuve à mercure (fig. 4) dans une salle où la température est + 18 °C; la pression atmosphérique est H = 74 cm de mercure; la dénivellation* h *est égale à 12 cm.*

Les différents termes utiles sont

$$V = 20 \text{ cm}^3$$

$$d = \frac{\text{masse moléculaire}}{29} = \frac{14+3}{29} = \frac{17}{29}$$

$$t = 18\ ^\circ\text{C}.$$

$$P_e = H - h = 740 - 120 = 620 \text{ mm de mercure.}$$

D'où :

$$M = 0{,}00129 \times \frac{17}{29} \times 20 \times \frac{620}{760} \times \frac{273}{273+18} = 0{,}011 \text{ g.}$$

Remarques

1. Si le niveau du mercure dans l'éprouvette est *au-dessous* du niveau de la cuve :

$$P_e = H + h.$$

2. Si la mesure comporte une grande précision, il peut être utile de transformer la pression P_e en hauteur de mercure *normal.*

3. Si la mesure du volume s'effectue sur la *cuve à eau,* il ne faut pas oublier :

a) de transformer la dénivellation *h* mm d'eau en millimètres de *mercure*;

b) de tenir compte de la *vapeur d'eau mélangée au gaz étudié.* Nous reviendrons sur cette question dans la *leçon 25.*

D. MÉLANGES DE GAZ PARFAITS

10. EXPÉRIENCE DE BERTHOLLET[1]. — Dans une expérience célèbre, *Berthollet* réalisa le dispositif suivant : deux ballons A_1 et A_2 remplis à la même pression P l'*un de gaz léger* (hydrogène), *l'autre de gaz lourd* (gaz carbonique) furent abandonnés, disposés comme l'indique la figure 5, les robinets de communication R_1 et R_2 ouverts, dans une cave à température bien constante pour éviter tous courants de convection.

Après deux ou trois jours, Berthollet, fermant les robinets R_1 et R_2, sépara les deux ballons et reconnut :

a) que chaque ballon contenait les deux gaz en *mélange homogène de même composition*;

b) que la pression dans chaque ballon était restée *égale à la pression initiale* P du remplissage.

Nous pouvons interpréter ce résultat ainsi :

Les molécules gazeuses, animées de leurs mouvements

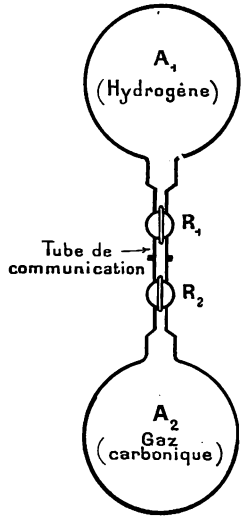


FIG. 5.
Expérience de Berthollet.

(1) BERTHOLLET (V. notice biographique).

incessants, se répandent spontanément, plus ou moins rapidement, dans tout l'espace qui leur est offert; la diffusion est donc complète malgré la différence considérable des densités.

Nous admettrons que chacun des gaz, diffusé dans le volume total, *se comporte comme s'il était seul.* La pression qu'il prend, après cette diffusion, est appelée : ***pression partielle.***

La température étant constante, si P est la pression finale, p_1 la pression partielle de l'hydrogène, p_2 celle du gaz carbonique, si V_1 et V_2 sont les volumes des ballons A_1 et A_2, la loi de Mariotte s'écrit :

pour l'hydrogène : $p_1(V_1 + V_2) = P \times V_1$;

pour le gaz carbonique : $p_2(V_1 + V_2) = P \times V_2$

d'où : $$p_1 = P.\frac{V_1}{V_1 + V_2}; \qquad p_2 = P.\frac{V_2}{V_1 + V_2}$$

et

$$p_1 + p_2 = P.\frac{V_1 + V_2}{V_1 + V_2} = P.$$

La pression totale du mélange est donc égale à la somme des pressions partielles des gaz constituants.

Généralisons. — Mélangeons plusieurs gaz pris initialement dans les états suivants :

Gaz G_1 : P_1 V_1 T_1
Gaz G_2 : P_1 V_2 T_2
Gaz G_3 : P_3 V_3 T_3

etc.

Ces gaz, placés dans une enceinte préalablement vide, forment un mélange occupant un volume V sous la pression P, à la température T. Établissons une relation entre toutes ces variables.

G_1 introduit dans l'enceinte prend une pression partielle x_1 telle que:

$$\frac{x_1.V}{T} = \frac{P_1.V_1}{T_1}$$

d'où :

$$x_1 = P_1.\frac{V_1}{V}.\frac{T}{T_1}$$

De même pour G_2 ... : $$x_2 = P_2.\frac{V_2}{V}.\frac{T}{T_2}$$ etc.

Faisons la somme des pressions partielles :

$$x_1 + x_2 + x_3 + \ldots = \frac{T}{V}\left(\frac{P_1.V_1}{T_1} + \frac{P_2.V_2}{T_2} + \frac{P_3.V_3}{T_3} + \ldots\right) = P$$

D'où la relation :

$$\boxed{\frac{P.V}{T} = \frac{P_1.V_1}{T_1} + \frac{P_2.V_2}{T_2} + \frac{P_3.V_3}{T_3} + \ldots.}$$

C'est l'*équation caractéristique des gaz parfaits étendue aux* **mélanges de gaz.**

EXERCICES

1. Une ampoule de verre fermée contient 272 g de mercure et 1 cm³ d'air à 0° et sous la pression atmosphérique normale. Quelle est la nouvelle pression de l'air quand on porte l'ampoule à 100°? Coefficient de dilatation linéaire du verre : 10^{-5}; coefficient de dilatation absolue du mercure : $1{,}8.10^{-4}$. Rép. : 1,95 atm.

2. Un ballon-sonde fermé rempli d'hydrogène au sol, à 0°, sous la pression atmosphérique normale, a un volume de 0,5 m³. Quel est son volume quand il parvient à l'altitude 20 000 m où la pression atmosphérique est 100 mm de mercure, la température — 54°?

On admettra que a pression est la même l'intérieur et à l'extérieur du ballon.

Rép. 3,04 m³.

3. Quel est la masse volumique de 'hydrogène sous la pression de 3 atm et à la température de 100 °C? Quelle est la densité dans les mêmes conditions? Rép. : $0{,}19 \times 10^{-3}$ g/cm³; 0,069.

4. Quel volume de vapeur d'eau obtient-on en vaporisant 1 g d'eau à 200° C sous la pression de 16 atm? Rép. : 135 cm³.

5. Sachant que la pression atmosphérique du moment est 72 cm de mercure, quel est la masse d'anhydride sulfureux recueillie dans l'éprouvette

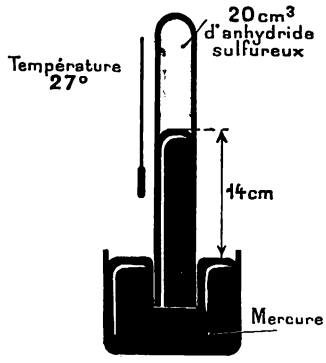


FIG. 6.

de la figure 6? S = 32 O = 16.

Rép. : 0,04 g.

6. On met en communication deux ballons à la température de 0°; l'un de 3 l, est rempli de gaz carbonique sous la pression de 4 atm; l'autre de 1 l, est rempli d'hydrogène sous la pression de 6 atm. Quelles sont les pressions partielles du gaz carbonique et de l'hydrogène dans le mélange?

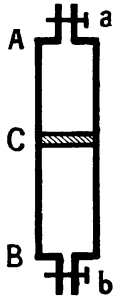
Quelle est la pression du mélange?

Quel est la masse volumique du mélange?

Rép. : CO_2 : 3 atm.; H_2 : 1,5 atm.; 4,5 atm.; 0,006 g/cm³.

PROBLÈMES

1. Un piston hermétique C, imperméable à la chaleur, d'épaisseur e et de poids P, glisse sans frottement dans un cylindre AB, indilatable et imperméable à la chaleur, de longueur $2l + e$, de section intérieure s, dont les extrémités A et B peuvent communiquer, à l'aide de robinets a et b, avec l'air extérieur sous la pression H_0, à la température t_0.



1° Le cylindre étant horizontal et C étant à égale distance des bases, on ouvre a et b; puis on les ferme et on met le cylindre verticalement. C descend.

2° Puis on ouvre b.

Calculer les deux déplacements successifs du piston et les valeurs de la pression dans l'espace AC à la fin de chacune des deux expériences.

3° Le cylindre restant vertical et b ouvert, à quelle température t l'air situé en AC devrait-il être porté pour que le piston C reprît sa position initiale au milieu de BC?

Application numérique : $l = 20$ cm; $s = 5$ cm²; P = 2 kgf; $H_0 = 75$ cm de mercure ($\simeq 1$ kg/cm²); $t_0 = 15$ °C; coefficient de dilatation de l'air sous pression constante $\alpha = \frac{1}{273}$. (*Bacc.*, Caen, 1947.)

2. Une microbalance comporte un fléau très léger portant à l'un de ses bouts un plateau (A) sous lequel est suspendu un ballon en verre fermé, de volume extérieur 10 cm^3, et, à l'autre bout, un contrepoids de volume négligeable. L'appareil est placé dans une cage vitrée étanche où l'on peut faire varier la pression de l'air.

A la température de 0 °C et sous la pression normale de 760 mm de mercure, le fléau est en équilibre quand on place sur le plateau A une certaine masse m.

1° Calculer la poussée de l'air sur le ballon, sous la pression normale, et sous une pression deux fois plus petite. Dans ce dernier cas, quelle masse faut-il enlever sur le plateau pour rétablir l'équilibre?

2° De combien variera la masse m nécessaire à l'équilibre quand la pression de l'air contenu dans la cage varie de 1 mm de mercure?

3° Sur le plateau, on remplace la masse m par un corps de masse inconnue x. On constate que, pour rétablir l'équilibre du fléau, il faut amener la pression de l'air de la cage à 190 mm de mercure. Calculer la valeur de x, sachant que $m = 10$ mg.

4° Si, la pression restant égale à 190 mm de mercure, la température de l'air passait de 0 à 10 °C, quelle serait la nouvelle valeur de x à l'équilibre? Chercher quelle élévation de température produirait la même variation de x qu'une diminution de pression de 1 mm de mercure, celle-ci étant supposée effectuée au voisinage de 0 °C et 190 mm.

Masse du centimètre cube d'air à 0° et sous la pression de 760 mm de mercure : 1,293 mg. Coefficient de dilatation de l'air : 1/273.

Dans tous les calculs, les masses seront évaluées en milligrammes.

(*Bacc.* Toulouse, 1946.)

3. Un récipient indilatable de 10 litres est muni d'un robinet R qui permet de le faire communiquer avec l'atmosphère.

1° R étant fermé, le récipient renferme de l'air à 0 °C, sous la pression de 114 cm de mercure. Quelle est la masse de l'air contenu dans le récipient?

2° R restant fermé, on chauffe le récipient à 100 °C. Quelle est la pression de l'air dans le récipient?

3° On ouvre R, l'ensemble étant maintenu à 100 °C. Quel est la masse d'air qui reste dans le récipient?

4° On ferme R et on ramène l'ensemble à 0 °C. Quelle est la pression de l'air dans le récipient?

Masse volumique de l'air à 0 °C et sous la pression normale : 1,3 g par litre. Pression atmosphérique extérieure : 76 cm de mercure.

(*Bacc.* Clermont, 1946.)

4. 1° Un ballon-sonde possède une enveloppe élastique, mince, de poids 30 gf. On le gonfle d'hydrogène, à la pression atmosphérique normale et à 0 °C. Il prend la forme d'une sphère de rayon 30 cm. Quelle est la masse d'hydrogène utilisée?

2° Le ballon est alors fermé puis porté dans l'air à + 27 °C. Son rayon devient 31 cm. Quelle est, en millimètres de mercure, la pression de l'hydrogène?

3° La température de l'air ambiant étant toujours + 27 °C et la pression atmosphérique étant égale à 745 millimètres de mercure, quel est le poids maximum des appareils que le ballon peut emporter, *au voisinage du sol*?

4° Lâché avec une certaine charge d'appareils, le ballon traverse successivement des couches d'air de plus en plus raréfié et, finalement, éclate. Le thermomètre enregistreur, de retour au sol indique la température au moment de l'éclatement : — 56°. Un essai montre, d'autre part, que l'enveloppe élastique d'un ballon identique au précédent éclate quand le diamètre du ballon devient 1,8 mètre. Enfin le tableau suivant donne la valeur moyenne de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude :

h (*km*)	p (*mmHg*)	h	p	h	p
0	760	6	353	15	90
1	664	8	267	20	41
2	596	10	198	30	8
4	462	12	146		

On demande quels étaient, au moment de l'éclatement :

a) la pression de l'hydrogène,

b) l'altitude minimum atteinte,

c) la force ascensionnelle du ballon (ordre de grandeur).

Masse de 1 litre d'air aux conditions normales : 1,29 g.

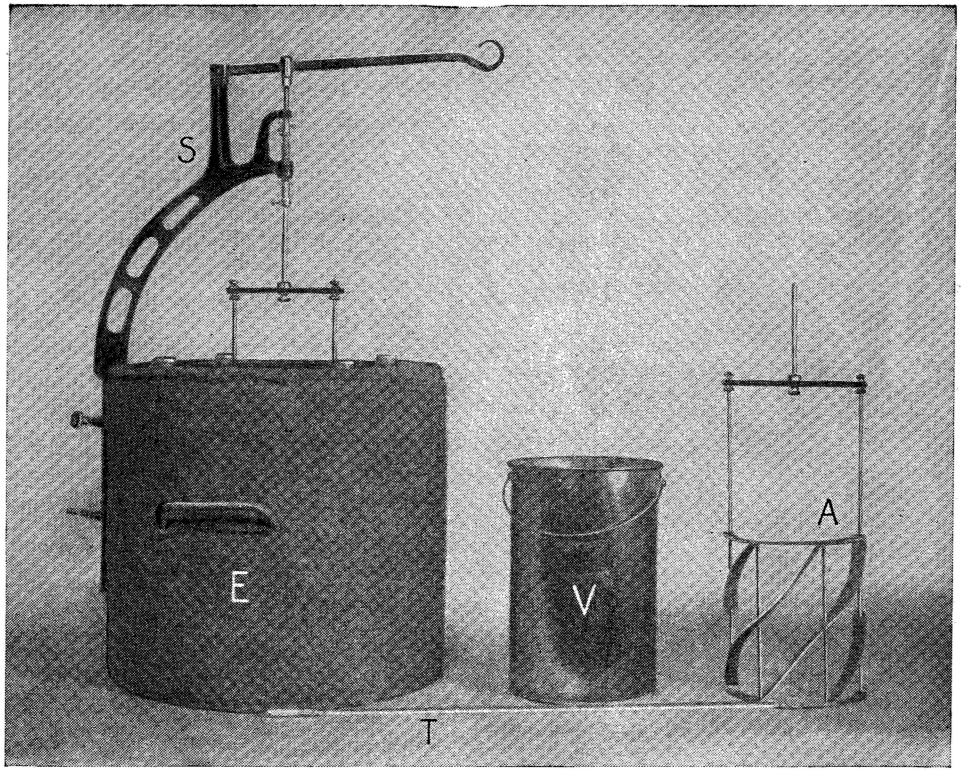


Photo Hatier.

FIG. 1. — *Calorimètre avec ses accessoires.*

E *: enveloppe extérieure en feutre;* **S** *: support et dispositif d'entraînement de l'agitateur;* **V** *: vase calorimétrique;* **A** *: agitateur tournant à ailettes;* **T** *: thermomètre de précision. Ce calorimètre sert à la mesure des quantités de chaleur dégagées dans certaines réactions chimiques (combustions).*

23. CALORIMÉTRIE

A. NOTION DE QUANTITÉ DE CHALEUR

1. SOURCES DE CHALEUR. — Plusieurs fois déjà nous avons eu l'occasion d'élever la température de certains corps solides, liquides, gazeux; nous disons que nous leur avons fourni de la ***chaleur.***

Les sources de chaleur sont très diverses :

a) **Réactions chimiques.** — De très nombreuses réactions chimiques fournissent de la chaleur : *neutralisation* d'un acide par une base, attaque d'un métal par un acide, etc. Les *combustions* (vives ou lentes) dégagent de la chaleur : les combustions vives du charbon, du bois, du gaz d'éclairage, du pétrole sont de très importantes sources de chaleur.

b) **Courant électrique.** — Un radiateur électrique, un réchaud, une lampe à incandescence échauffent les corps de leur voisinage.

c) **Refroidissement d'un corps chaud.** — Les corps chauds (bouillote, fer à repasser, etc.) transmettent aux corps froids voisins la chaleur qu'ils ont en réserve jusqu'à ce que les températures s'égalisent en un *équilibre thermique.*

d) **Frottement.** — Tous les phénomènes de frottement dégagent de la chaleur (frottement d'un frein sur son tambour, des mains l'une contre l'autre).

e) **Changement d'état physique.** — Quand l'eau d'une bouilloire atteint la température de 100 °C, il faut continuer de lui fournir de la chaleur pour la faire passer à l'état gazeux. Inversement, la vapeur d'eau qui se condense en eau liquide restitue de la chaleur.

2. EFFETS DE LA CHALEUR. CHALEUR ET TEMPÉRATURE. — Comme les autres grandeurs physiques déjà rencontrées : force, travail, pression, température... la *chaleur* se montre surtout bien par *ses effets*, qui offrent les caractères suivants :

a) ***Ils sont le résultat d'échanges de chaleur.*** — L'eau chaude que nous versons dans l'eau froide lui cède de la chaleur. Pendant le mélange il y a variation simultanée de la température du liquide qui *donne* et de celui qui *reçoit* de la chaleur; c'est là une observation très fréquente.

b) ***Ils peuvent avoir lieu sans variation de la température.*** — Pour continuer de se transformer en vapeur, de l'eau en train de bouillir exige que le foyer lui apporte constamment de la chaleur, et cependant *sa température ne varie pas.* La glace qui fond reçoit sans arrêt de la chaleur du milieu ambiant, et cependant, pendant toute la durée de la fusion le mélange eau liquide — eau solide *reste à* 0 °C. Dans ces deux cas le corps qui *reçoit* de la chaleur conserve une température invariable, mais *change d'état physique.*

La chaleur est donc ce qui est acquis ou perdu par une substance dont la température varie sous un même état physique; c'est aussi ce qui est acquis ou perdu par une substance qui *change d'état physique à température constante.*

Ces exemples montrent bien qu'il faut distinguer les notions de **chaleur** et de **température.** Sous le prétexte que souvent leurs variations sont simultanées (un gain de chaleur s'accompagne alors d'une élévation de la température du corps qui le reçoit) il faut se garder de les confondre : ***chaleur et température sont deux grandeurs bien distinctes.***

3. LA CHALEUR, GRANDEUR MESURABLE. — Pour comparer des quantités de chaleur, on peut comparer soit les causes *qui les produisent* soit les effets *qu'elles produisent.* Ainsi on peut naturellement penser que la quantité de chaleur fournie par la combustion du gaz dans un brûleur Bunsen est proportionnelle :

a) soit à la *masse* (ou au volume) du gaz brûlé;

b) soit à la *masse* de glace qu'on peut fondre, à température constante, en utilisant cette combustion;

c) soit à l'*élévation de la température* subie par une certaine masse d'eau à laquelle on a transmis cette chaleur;

d) soit à la *masse* d'eau qui a subi une certaine élévation de température en recevant la chaleur.

Or, ces différentes conventions, entre lesquelles on a le choix, sont bien *concordantes.* En effet :

a) Soit 1 kilogramme d'eau. Pour élever sa température de $1\ ^oC$, $2\ ^oC$, $3\ ^oC$,... nous devons brûler des volumes de gaz respectivement égaux à V, $2V$, $3V$....

b) Ces mêmes volumes de gaz brûlés peuvent déterminer la fusion de m, $2m$, $3m$ grammes de glace.

c) Ils élèveraient de 5 °C, par exemple, la température de m', $2m'$ $3m'$... d'eau.

Si nous convenons de choisir un de ces effets (ou une cause) et de dire que la quantité de chaleur mise en jeu est proportionnelle à la grandeur de cet effet, nous faisons de la chaleur une grandeur mesurable. Dès lors nous pouvons fixer une *unité.*

4. UNITÉ : LA KILOCALORIE.

Définition : *Une kilocalorie (kcal) est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 kilogramme d'eau.*

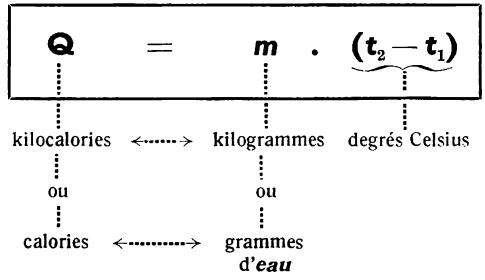
Remarque. — En toute rigueur, cette quantité de chaleur étant légèrement différente suivant la température initiale de l'eau qu'on échauffe de 1 °C, on a choisi pour définir la kilocalorie la température moyenne de + 15 °C. Une kilocalorie est donc la quantité de chaleur qui, fournie à 1 kilogramme d'eau, élève sa température de 14,5 °C à 15,5 °C. En pratique on ne tient pas compte, dans les calculs, de cette restriction de détail.

Autres unités :

La ***calorie (cal)*** est le *millième de la kilocalorie*; c'est donc *la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme d'eau pour élever sa température de 1 °C.*

La ***thermie (th)*** = 1 000 000 *calories* = 1 000 *kilocalories.*

5. RELATION FONDAMENTALE. — Les définitions précédentes permettent d'exprimer la quantité de chaleur **Q** reçue par une masse **m** *d'eau* dont la température passe de t_1°C à t_2°C, température plus élevée; **Q** est proportionnelle à **m** et à $(t_2 - t_1)$; soit, en tenant compte des unités :



Exemple numérique. — *La quantité de chaleur utilisée pour porter 200 g d'eau de + 50 °C à + 54 °C est :*

$$Q = 200 \times 4 = 800 \text{ calories.}$$

B. MESURE DES QUANTITÉS DE CHALEUR

La mesure des quantités de chaleur est la **Calorimétrie.**

6. LES PRINCIPES DE LA CALORIMÉTRIE. — La calorimétrie repose sur deux principes généraux, que l'expérience n'a jamais mis en défaut :

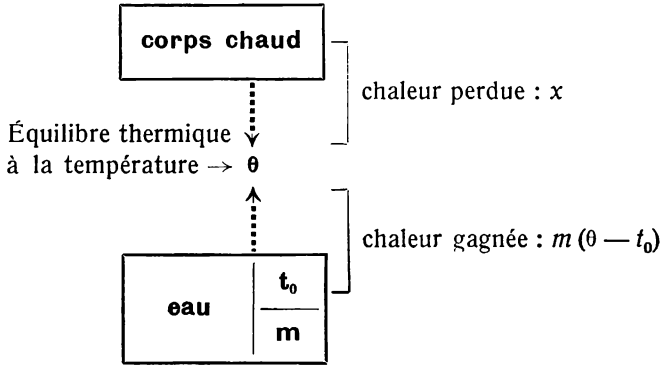
1. **Principe des échanges.** — *Quand deux corps échangent de la chaleur, la quantité de chaleur* ***perdue*** *par l'un est égale à la quantité de chaleur* ***gagnée*** *par l'autre.*

2. **Principe des transformations inverses.** — *Quand un corps* ***reçoit*** *une quantité de chaleur lors d'une certaine transformation, il* ***cède*** *la même quantité de chaleur lors de la transformation inverse.*

Ainsi 200 g d'eau exigent 400 calories pour passer de + 10 °C à + 12 °C. Ils restituent 400 calories en revenant de + 12 °C à leur température initiale + 10 °C.

Ces deux principes expriment la *Conservation de la Chaleur* par un système de corps subissant des transformations quelconques *sans mise en jeu de travail.*

7. LA MÉTHODE DES MÉLANGES. SES CONDITIONS. — Proposons-nous de mesurer la quantité de chaleur x cédée par un corps chaud à de l'eau plus froide. Il suffit de connaître la masse d'eau m, initialement à la température t_0 **C**, qui, mise en étroit contact avec le corps proposé, se met finalement en équilibre thermique avec lui, à la température θ °**C**. L'échange de chaleur se fait suivant le schéma :



Le principe des échanges conduit directement à :

$$x = m\,(\theta - t_0).$$

C'est la **méthode des mélanges,** ainsi nommée par ce qu'il faut réaliser entre le corps et l'eau *le meilleur contact possible* pour favoriser la transmission de la chaleur et obtenir un bon équilibre thermique.

Malheureusement, en pratique, deux difficultés surviennent :

a) Pendant le transfert de la chaleur, une partie de celle-ci risque d'être détournée de sa destination, à moins que le mélange du corps qui cède (ou reçoit) et de l'eau ne soit effectué dans un appareil *parfaitement isolé* de l'extérieur, qu'on appelle *calorimètre.*

b) A l'intérieur du calorimètre, l'eau est obligatoirement contenue dans un récipient *qui participe, lui aussi,* aux échanges.

LA FUITE THERMIQUE D'UN CALORIMÈTRE. — En construisant un calorimètre on doit donc l'isoler de l'extérieur par une « *barrière* » absolument impénétrable à la chaleur. Or, les corps chauds cèdent de la chaleur aux corps froids de diverses manières :

α) **Par conduction,** c'est-à-dire *par contact.* Une barre de fer dont une extrémité est plongée dans un foyer transmet la chaleur à travers les couches métalliques qui la constituent. Les métaux sont en général très bons conducteurs de la chaleur.

β) **Par convection,** c'est-à-dire en utilisant les *fluides en mouvement* comme véhicules de calories. Ainsi l'eau transporte dans les conduites de chauffage central les calories produites au niveau de la chaudière; l'air, s'échauffant au voisinage des radiateurs, s'élève et va réchauffer les parties hautes d'une pièce.

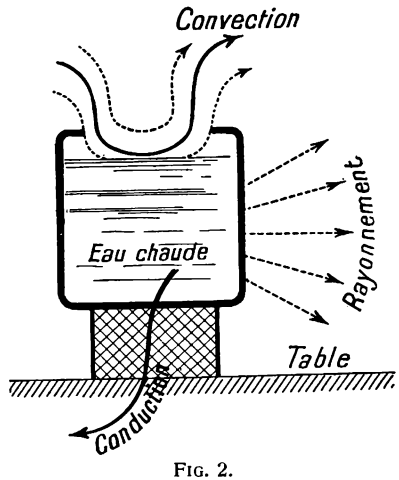


FIG. 2.

γ) **Par rayonnement,** c'est-à-dire *à travers le vide,* sans aucun support matériel solide ou fluide. Le soleil nous envoie ainsi des quantités considérables de chaleur à travers les espaces vides interplanétaires. Le rayonnement obéit à certaines lois; en particulier :

Il est d'autant plus important qu'entre le corps chaud (source) et le corps froid (récepteur) existe une plus grande différence de température (loi de NEWTON [1]). Les métaux polis rayonnent moins de chaleur que les métaux non polis. La chaleur rayonnée se réfléchit comme la lumière sur les surfaces polies.

La figure 2 résume ces pertes de chaleur pour un vase sans couvercle, mal isolé.

On peut difficilement éviter toute perte de chaleur dans les mesures calorimétriques. Notons qu'une *fuite thermique* pourra être *positive* si la température du calorimètre est supérieure à celle du milieu ambiant, *négative* dans les cas contraires.

LA VALEUR EN EAU D'UN CALORIMÈTRE. — Soit un vase calorimétrique, avec agitateur et thermomètre, que nous supposerons parfaitement garanti de toute fuite thermique. Initialement il est vide et le thermomètre indique la température $t = 15\ ^{o}C$. Versons dedans *200 grammes* d'eau à la température $t' = 60\ ^{o}C$. Nous observons que la température se fixe presque aussitôt à $\theta = 54\ ^{o}C$. Écrivons l'échange de chaleur entre l'eau chaude et le vase :

$$\left.\begin{array}{r}\text{Eau chaude : } t' = +\,60\ ^{o}C\\ \text{Équilibre final à : } \theta = +\,54\ ^{o}C\end{array}\right\} \text{ chaleur perdue : } Q = 200\,(60 - 54) \text{ calories}$$

$$\left.\begin{array}{r}\text{Équilibre final à : } \theta = +\,54\ ^{o}C\\ \text{Calorimètre : } t = +\,15\ ^{o}C\end{array}\right\} \text{ chaleur gagnée : } Q.$$

Le vase calorimétrique et ses accessoires ont donc absorbé une quantité de chaleur, *comme l'aurait fait une masse d'eau.* Cette masse étant désignée par μ :

$$\mu(54 - 15) = 200\,(60 - 54).$$

Soit :
$$\mu = \frac{200 \times 6}{39} \simeq 31 \text{ grammes.}$$

Toutes les fois qu'un corps quelconque, contenu dans le calorimètre, participe à des

(1) NEWTON (V. notice biographique).

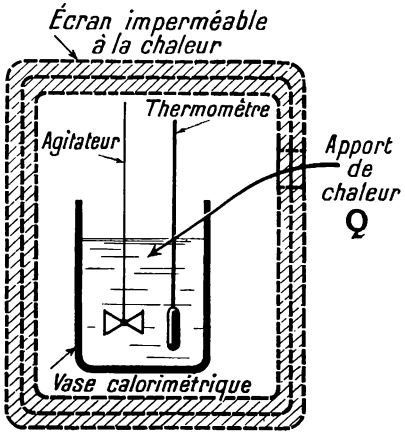


FIG. 3.

échanges de chaleur, le calorimètre lui-même intervient ***comme une masse d'eau égale à μ grammes.*** Cette masse est nommée pour cette raison **masse en eau** (ou *valeur en eau*) du vase calorimétrique muni de ses accessoires.

ÉQUATION CALORIMÉTRIQUE. — Supposons connue la valeur en eau μ d'un calorimètre et plaçons à l'intérieur du vase calorimétrique une masse d'eau m. Quand la température s'est stabilisée notons sa valeur t_i (température *initiale*). Apportons à l'ensemble une quantité de chaleur Q. La température *finale* du vase et de son contenu est t_f ; le Principe des échanges est traduit par :

$$Q = (m + \mu)\,(t_f - t_i).$$

C'est l'*équation calorimétrique.*

Remarque. — La valeur en eau est généralement déterminée une fois pour toutes. Au cours d'une expérience particulière on apporte, avec A grammes d'eau chaude à t_1 °C, de la chaleur à B grammes d'eau froide à t_2 °C placés dans le vase. La température finale s'établit à la valeur θ ; donc : $A\,(t_1 - \theta) = (B + \mu)\,(\theta - t_2)$.

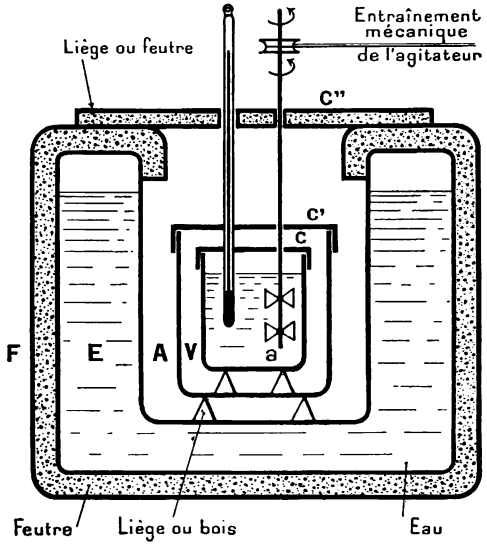


FIG. 4. — *Calorimètre de Berthelot.*

μ, seule inconnue de l'équation, est ainsi déterminée. Cette mesure constitue un « tarage » du vase calorimétrique et des accessoires, si on conserve le *même* vase, avec le *même* agitateur et le *même* thermomètre.

8. CALORIMÈTRE DE BERTHELOT [1]. — La figure 4 est une coupe schématique de cet appareil.

Le **vase calorimétrique** V est en *platine* ou en *laiton doré, poli* extérieurement pour atténuer le rayonnement. Pour réduire les pertes de chaleur par conduction, il repose sur trois *pointes de liège* (mauvais conducteur de la chaleur) à l'intérieur d'un **deuxième vase A** *poli intérieurement* et *extérieurement.* Ainsi A réfléchit vers V les faibles quantités de chaleur que ce dernier peut lui transmettre, et réfléchit

(1) BERTHELOT (V. notice biographique).

également la chaleur qui lui parvient de l'extérieur. Il est supporté lui-même par trois *pointes isolantes.*

Une **enceinte E,** à *doubles parois,* entoure les deux vases. Elle contient une masse importante d'*eau* (5 à 10 kg) interposée ainsi entre le calorimètre et le milieu ambiant. Cette eau, dont la température ne peut varier que lentement, contribue à maintenir le calorimètre dans des conditions fixes et connues pendant la durée d'une mesure. L'enceinte E est protégée elle-même par une épaisse **couche de feutre.**

Des **couvercles** *c, c', c''* complètent l'installation; en fractionnant l'espace autour du vase V, ils s'opposent aux courants de convection de l'air. Des ouvertures juste suffisantes sont prévues pour le passage d'un **thermomètre,** d'un **agitateur** le plus souvent entraîné mécaniquement.

Précision d'une mesure. — Malgré toutes ces précautions, il existe toujours une légère fuite thermique qu'il convient d'évaluer dans les mesures précises. Comme on cherche toujours à atténuer cette cause d'erreurs en diminuant le rayonnement, on doit conduire les mesures de façon à observer une *faible* variation de température (une fraction de degré très souvent). Nous savons d'autre part (Leçon 19, § 8) que les meilleurs thermomètres à mercure ont une sensibilité médiocre. Il en résulte des *erreurs de mesure importantes.* Ainsi, opérons avec un thermomètre gradué en 1/50 de degré sur lequel l'erreur de lecture peut atteindre $\frac{1^o}{100}$; l'erreur absolue possible sur la mesure de toute variation de température est $2 \times \frac{1^o}{100}$. L'élévation de température observée étant par exemple 0°,8, l'erreur relative sur le terme $t_f - t_i$ de la relation :

$$x = (m + \mu)(t_f - t_i)$$

est :

$$\frac{\Delta(t_f - t_i)}{t_f - t_i} = \frac{\frac{2}{100}}{0{,}8} = \frac{2}{80} = \frac{1}{40}.$$

On comprend par cet exemple que les mesures calorimétriques classiques comptent *parmi les plus imparfaites de la Physique.* La mesure d'une quantité de chaleur se fait souvent avec une incertitude relative de l'ordre de 1/50 ou 1/100; rarement on atteint 1/1 000.

9. UTILISATION DES VASES DEWAR-D'ARSONVAL. — Pour supprimer toute perte par convection, D'ARSONVAL [1] imagina de fabriquer des vases à **double paroi.** Un **vide** très poussé était fait entre les parois. DEWAR [2] eut l'idée d'*ar-*

(1) D'ARSONVAL. — (2) DEWAR (V. notices biographiques).

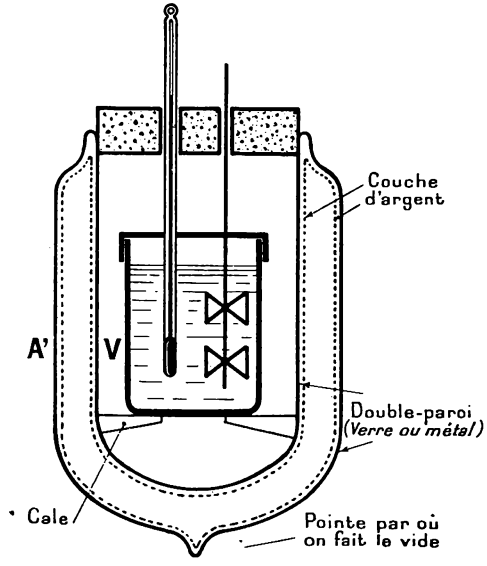


FIG. 5. — *Calorimètre Dewar-d'Arsonval.*

genter les deux faces internes en regard l'une de l'autre, pour diminuer le rayonnement. De là dérivent les bouteilles genre « Thermos » très répandues à l'heure actuelle et adoptées comme enceintes imperméables à la chaleur dans certains calorimètres industriels.

La figure 5 représente un appareil destiné à la mesure d'une chaleur de combustion. Le vase A du calorimètre de BERTHELOT est remplacé par un vase A' à double paroi (verre ou métal argenté). Les cales supportant le vase V sont soudées à la paroi interne.

Le récipient A' est lui-même placé à l'intérieur d'une enveloppe ordinaire remplie d'eau. Les fuites de chaleur sont très réduites, les mesures assez précises.

Remarque. — Le calorimètre idéal, supprimant toute perte de chaleur, peut être réalisé en maintenant constamment *égales* les températures de l'*extérieur* et du *vase V* des montages précédents. Dans certains appareils modernes, l'eau de l'enceinte E est maintenue automatiquement, pendant toute la durée des mesures, à la *température de l'eau du vase calorimétrique.* Les mesures atteignent alors un haut degré de précision.

C. CHALEURS MASSIQUES

10. DÉFINITION D'UNE CHALEUR MASSIQUE. — Choisissons une source de chaleur bien *régulière* qui, par seconde, fournit toujours le même nombre de calories; ce sera une *résistance électrique* (thermoplongeur).

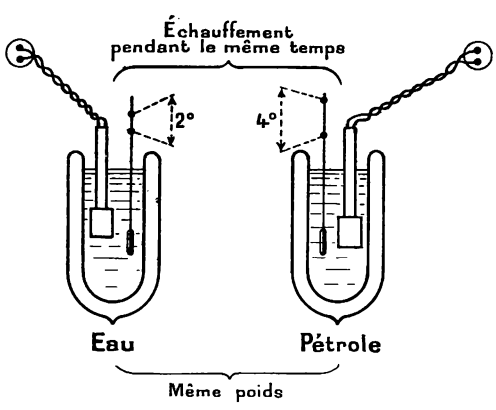


FIG. 6. — *L'eau et le pétrole n'ont pas même chaleur massique.*

Immergeons cet appareil, parcouru par le courant, pendant le *même temps*, dans *la même masse* d'eau puis de pétrole (fig. 6).

Nous constatons que si la température de l'eau s'est élevée de 2 *degrés* par exemple, celle du pétrole s'est élevée d'environ 4 *degrés.*

Nous devons conclure que pour élever la température de 1 g de pétrole de 1° il faut deux fois moins de calories que pour 1 g d'eau, soit 0,5 cal.; nous dirons que sa ***chaleur massique*** est 0,5 calorie par gramme et par degré.

Définition : *On appelle chaleur massique d'une substance la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° Celsius la température de l'unité de masse de cette substance, sans changement d'état physique.*

11. UNITÉ. — Si on adopte le *kilogramme* comme unité de masse il lui correspond, comme unité de chaleur massique, la *kilocalorie par kilogramme par degré* ***(kcal/kg.°)***. Si l'unité de masse est le *gramme*, l'unité de quantité de chaleur la *calorie*, l'unité de chaleur massique est la calorie par gramme et par degré ***(cal/g. °)***. Dans les deux cas, une chaleur massique s'exprime par le même *nombre*.

12. FORMULE FONDAMENTALE. — Nous pouvons maintenant écrire l'expression de la chaleur reçue (ou cédée) par un corps de masse m, de *chaleur massique* c, dont la température varie de t_1 °C à t_2 °C :

1 kg de substance demande c kcal pour modifier sa température de 1 °C
m kg de substance demandent $m.c$ kcal pour modifier leur température de 1 °C
m kg de substance demandent $m.c\,(t_2 - t_1)$ pour modifier leur température t_1 °C à t_2 °C.

$$Q = m \cdot c\,(t_2 - t_1).$$

kcal ⟵ kg — chaleur massique
cal ⟵ g

Le produit $m.c$ est appelé ***capacité calorifique*** de la substance.

13. MESURE D'UNE CHALEUR MASSIQUE. — 1. **Méthode.** — On utilise la méthode des mélanges. Pour cela :

a) on chauffe à $t°$ une masse m grammes de substance;

b) on porte la substance dans un calorimètre contenant, à $t_1°$, M grammes d'eau et dont la valeur en eau est μ;

c) on note la température d'équilibre finale θ.

D'après les principes de Calorimétrie on écrit :

$$\underbrace{mc\,(t - \theta)}_{\text{Chaleur cédée par la substance.}} = \underbrace{(M + \mu)\,(\theta - t_1)}_{\text{Chaleur reçue par l'eau et les accessoires.}}$$

d'où on tire :

$$c = \frac{(M + \mu)\,(\theta - t_1)}{m\,(t - \theta)}. \qquad [3]$$

2. **Réalisation.** — Soit à déterminer la chaleur massique du *cuivre*.

Un morceau de cuivre de masse connue est placé dans une *étuve* (la fig. 7 représente une étuve à chauffage électrique) dont la température est donnée par un thermo-

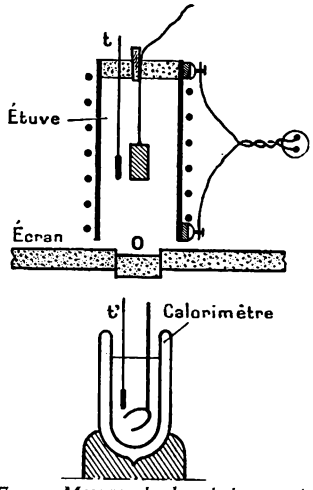


FIG. 7. — *Mesure de la chaleur spécifique d'un solide.*

mètre. Après avoir chauffé *lentement* et régulièrement pour obtenir un équilibre thermique entre l'air de l'étuve et le cuivre, on note la température atteinte t. Puis on démasque l'ouverture O ménagée dans un *écran épais* (bois, liège ou feutre) qui isole le calorimètre de l'étuve, et on plonge *rapidement* le solide dans l'eau du vase calorimétrique qui est à la température t_1.

On note la température finale θ.

La valeur en eau μ du calorimètre et des accessoires est déterminée par une expérience auxiliaire (§ 7).

La relation [3] donne **c.**

Les mesures de chaleurs massiques, comme toutes les mesures calorimétriques, sont assez peu précises.

14. RÉSULTATS. — La chaleur massique d'un corps dépend un peu de sa température. Nous avons déjà rencontré le cas de l'eau lors de la définition de la kilocalorie. Voici quelques chaleurs massiques *moyennes*, entre 0 °C et 100 °C, pour des solides et liquides :

CHALEURS MASSIQUES (kcal/kg.°)

	SOLIDES			LIQUIDES	
Métaux	Aluminium. .	c = 0,22	Masse atomique : 27	Mercure . . .	c = 0,033
	Fer	0,113	— 56	Éther	0,48
	Cuivre	0,095	— 63	Alcool	0,57
	Argent. . . .	0,05	— 108	Pétrole. . . .	0,5
	Étain	0,054	— 118	Glycérine. . .	0,58
	Or.	0,032	— 197	Acide sulfurique. . . .	0,6
	Plomb	0,031	— 207		
Métalloïdes	Carbone. diamant .	0,15	—		
	Carbone. graphite .	0,20	— 12		
	Carbone. ch. bois. .	0,25	—		
	Soufre	0,18	— 32		
	Iode.	0,05	— 127		
	Glace	0,5		Eau : 1 (par définition).	

Ce tableau appelle quelques remarques :

1. **Solides : Loi de Dulong et Petit.** — Faisons le produit de la masse atomique d'un *métal pur*, à l'état *solide*, par sa chaleur massique; nous trouvons les nombres suivants :

Aluminium	$27 \times 0{,}22$	$\simeq 5{,}9$
Fer	$56 \times 0{,}113$	$\simeq 6{,}3$
Cuivre	$63 \times 0{,}095$	$\simeq 6{,}1$
Argent	$108 \times 0{,}05$	$\simeq 5{,}4$
Étain	$118 \times 0{,}054$	$\simeq 6{,}4$
Or	$197 \times 0{,}032$	$\simeq 6{,}3$
Plomb	$207 \times 0{,}031$	$\simeq 6{,}4$

Il est remarquable que pour des métaux de *masses atomiques si différentes* (de 27 à 207), les produits soient *si voisins* les uns des autres.

Après de nombreuses mesures, DULONG et PETIT ont énoncé la loi suivante :

Loi : *Le produit de la chaleur massique d'un corps simple, à l'état solide, par sa masse atomique est à peu près constant et voisin de 6,4.*

$$A \cdot c \simeq 6{,}4.$$

masse atomique — chaleur massique

Cette loi, assez *bien vérifiée* à la température ordinaire par les *Métaux*, comme l'indiquent les nombres précédents, est *très mal suivie* par les *Métalloïdes*. L'expérience a d'ailleurs montré que la chaleur spécifique diminue beaucoup aux basses températures.

La loi de *Dulong* et *Petit* a servi dans quelques cas assez rares au choix de la masse atomique de certains métaux. Elle peut être employée pour avoir un ordre de grandeur de la chaleur massique d'un métal dont on connaît la masse atomique.

2. **Liquides.** — De nombreux liquides usuels ont une chaleur massique voisine de ***0,5***.

Le *mercure* (métal liquide) possède une chaleur massique (0,033) qui se rapproche de celle des métaux solides.

L'eau possède une très grande chaleur massique. A masse égale, et pour une même variation de température, l'eau absorbe ou cède une quantité de chaleur beaucoup plus grande que n'importe quel corps usuel.

On met à profit cette propriété en utilisant l'eau comme *véhicule de chaleur* (chauffage central, radiateurs d'automobiles), comme *réservoir de chaleur* (bouillottes), comme *volant thermique* (enceinte de calorimètre). Dans ce dernier cas, si une source parasite de chaleur produit, par exemple, des calories à l'extérieur de l'enceinte E (fig. 4), la transmission de la chaleur au vase V sera retardée, car la masse d'eau contenue entre

les deux parois peut emmagasiner beaucoup de calories sans élévation notable de sa température.

Le voisinage d'un grand lac ou de la mer contribue de même à réduire les écarts de la température atmosphérique; le climat maritime est *tempéré.*

3. **Gaz.** — Les gaz ont *deux* chaleurs massiques. L'une C_p représente le nombre de calories à fournir à 1 gramme de gaz pour élever sa température de 1 °C, *la pression restant constante* (par exemple échauffer l'air d'une salle qui communique toujours avec l'atmosphère). L'autre C_v est relative à un échauffement *à volume constant* (par exemple : échauffement de l'air contenu dans un ballon inextensible, fermé). Bien que plus faibles que celles des liquides (mercure excepté) les chaleurs massiques des gaz restent cependant du même ordre de grandeur. ***Air :*** $C_p = 0{,}24$, $C_v = 0{,}17$.

EXERCICES

1. A 100 g d'eau à la température de 10 °C on mélange 60 g d'eau à 55 °C.

Quelle est la température finale du mélange?

Rép. : 26,87 °C.

2. Le gaz de ville fournit 5 000 kilocalories par mètre cube de gaz brûlé. On met 10 minutes pour porter de 10° à 100° un litre d'eau, et on admet que 1/3 de la chaleur est dissipée inutilement dans l'atmosphère. Quel est le débit gazeux? (nombre de litres consommés par minute). Rép. : 2,7 l/mn.

3. Dans un calorimètre parfaitement isolé on place 200 g d'eau à 17 °C. On verse dans ce vase 20 g d'eau à 35 °C. La température finale atteinte est 18,55 °C. Quelle est la masse en eau du calorimètre? Rép. : 12,3 g.

4. Dans un calorimètre isolé, de valeur en eau 20 g, on a placé 280 g d'eau à 16 °C. On suit la marche du thermomètre et on constate un refroidissement lent et régulier de 0,1 degré par minute. Après dix minutes d'observation, on laisse écouler dans le calorimètre un filet d'eau à 20 °C pendant deux minutes. La température finale est 16,8 °C. Quelle masse d'eau a-t-on laissé écouler? Rép. : 200 g.

5. Un calorimètre en platine V a une masse de 100 g; le thermomètre est formé d'une tige de verre cylindrique de 4 mm de diamètre dont 10 cm sont plongés dans l'eau et dont le réservoir contient 0,6 cm³ de mercure; l'agitateur, en laiton, a une masse de 10 g. Sachant qu'on introduit dans le vase V 400 g d'eau, que les variations de température observées sont mesurées avec une erreur relative de 1/10, dire s'il y a lieu de tenir compte de la valeur en eau du vase et des accessoires.

Chaleur massique du laiton : 0,09 cal/g.°.

Chaleur massique du mercure : 0,033 cal/g.°.

Masse volumique du verre : 2,5 g/cm³. Chaleur massique du verre : 0,2. cal/g.°.

Le platine a une masse atomique égale à 195 g et suit la loi de Dulong et Petit.

Rép. : non; l'erreur relative résultante n'est que $\frac{1}{80} < \frac{1}{10}$.

6. Dans une bouteille Thermos, 600 g d'eau passent de 80 °C à 20 °C en douze heures. Quelle est la fuite thermique moyenne en calories par seconde?

Rép. : 0,83 cal/s.

7. Un morceau de platine de 50 g est placé dans un four à une température inconnue. On le plonge ensuite dans un calorimètre de valeur en eau 20 g contenant 380 g d'eau à 15 °C. La température finale est 18,5 °C. On admet qu'il n'y a aucune fuite thermique.

Quelle était la température du four?

Avec quelle erreur est-elle connue si le thermomètre permet de repérer les températures 15° et 18°,5 à 1/50 de degré près, si les mesures de masses sont faites à 10 g près, et si la valeur en eau est connue à 1 g près.

Chaleur massique du platine : 0,032 cal/g.°.

Rép. : $t = 8_{93}° \pm 13°$ environ.

8. Dans les radiateurs électriques modernes *à accumulation*, on chauffe, en utilisant le courant de nuit, une substance qui doit restituer la chaleur pendant la journée, et on cherche à donner aux appareils l'encombrement le plus faible possible.

Vaut-il mieux utiliser l'eau que l'on pourra porter de 15 °C à 95 °C ou la brique réfractaire, de densité 2, de chaleur massique 0,2 cal/g.° qui pourra être portée à 500 °C?

Rép. : on doit choisir la brique réfractaire.

PROBLÈMES

1. Dans un calorimètre de Berthelot, à la température ambiante de 15,5 °C, on verse 90 cm^3 d'eau tiède à 23 °C. La température d'équilibre est de 24,5 °C. Calculer la masse en eau du calorimètre.

Immédiatement après, on plonge dans le calorimètre 125 g de platine sortant d'une étuve à 103,7 °C. La nouvelle température d'équilibre est de 27,7 °C. Calculer la chaleur massique du platine.

On ajoute ensuite 23 cm^3 d'eau prise à la température ambiante. Quelle est la nouvelle température d'équilibre?

(*Bacc.*, Dijon, 1946.)

2. Dans un flacon de verre pesant 80 g, on chauffe 100 g d'alcool à la température de 75 °C et l'on plonge le système dans un calorimètre dont la valeur en eau est de 1 200 g. La température de ce calorimètre s'élève de 10 °C à 13,85 °C. Ayant retiré le flacon, on y ajoute 50 g d'alcool; on le porte de nouveau à 75 °C, puis on le plonge dans le même calorimètre, dont la température s'élève alors de 12 °C à 17,13 °C. Calculer les chaleurs massiques respectives du verre et de l'alcool.

(*Bacc.*, Lyon, 1946.)

3. 1° Un cylindre d'invar, de masse 329 g, subit, de la part d'un liquide L, une poussée égale à 50,28 gf à la température de 25 °C, et à 48,8 gf à 100 °C. Le même cylindre, plongé dans l'eau à 4 °C, subit une poussée de 40,000 gf.

Calculer le poids volumique du liquide à 25 °C et à 100 °C, ainsi que son coefficient moyen de dilatation dans cet intervalle de température. On ne tiendra pas compte de la dilatation très faible de l'invar.

2° Le cylindre est porté à 100 °C, puis plongé dans un calorimètre de valeur en eau 20 grammes, contenant 400 cm^3 du liquide L à 26 °C. La température finale d'équilibre est 32,7 °C. On répète la même expérience en remplaçant le cylindre d'invar par 200 cm^3 d'eau prise à 4 °C; la température d'équilibre est alors 16,8 °C. On demande de déterminer les chaleurs massiques de l'invar et du liquide L.

(*Bacc.*, Lyon, 1946.)

TRAVAUX PRATIQUES

N° 23. Chaleur massique d'un solide.

N° 24. Chaleur de neutralisation.

CHANGEMENTS D'ÉTAT PHYSIQUE D'UN CORPS PUR

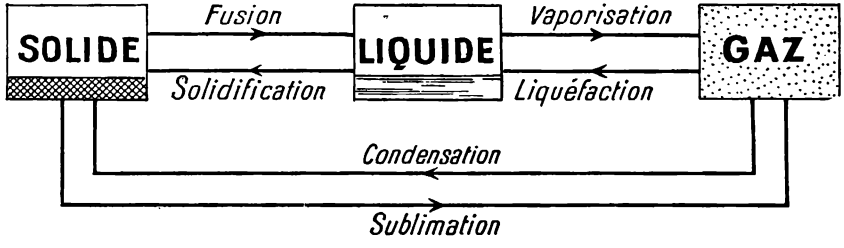
DÉFINITIONS. — Nous avons vu au début de ce livre (Leç. 1, § 5) qu'un même corps peut prendre successivement les trois états physiques : solide, liquide, vapeur.

Un morceau de glace chauffé fond et donne de l'eau liquide; il subit la ***fusion.*** Inversement, l'eau liquide qui se congèle subit la ***solidification.***

L'eau liquide chauffée à 100° sous la pression atmosphérique passe à l'état de vapeur d'eau : il y a ***vaporisation.*** Inversement, quand la vapeur d'eau se condense en eau liquide, elle subit la ***liquéfaction.***

Quelques corps passent directement, quand on les chauffe dans les conditions habituelles de pression de l'état solide à l'état gazeux sans subir la fusion et la vaporisation intermédiaires; on dit qu'il y a ***sublimation.*** Le phénomène inverse est la ***condensation.***

Tous ces phénomènes sont des **changements d'état physique.** Nous les résumerons dans le tableau suivant :



Nous ferons une étude expérimentale de la fusion et de la transformation inverse, la solidification.

Nous analyserons les différents modes de vaporisation et nous dirons seulement quelques mots de la liquéfaction des gaz.

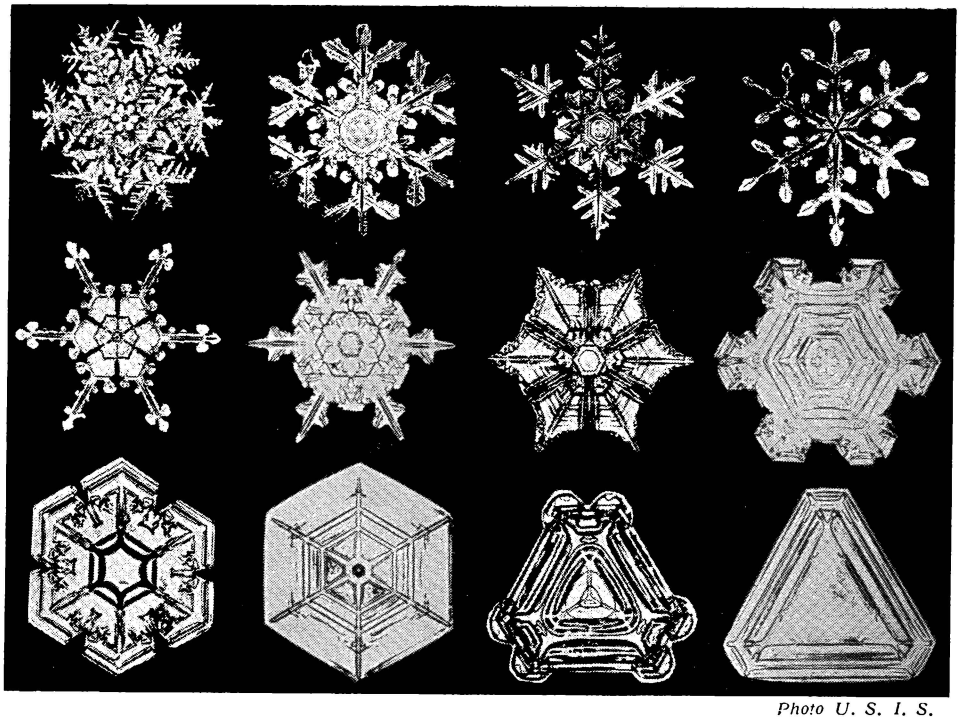


Photo U. S. I. S.

FIG. 1. — *Cristaux de neige (très grossis).*
La fusion détruit l'harmonie des formes de la matière. La solidification la fait souvent renaître. Qui n'a été frappé de l'élégance de certains cristaux de neige?

24. FUSION ET SOLIDIFICATION[1]

A. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE. LOIS

1. DIFFÉRENTS ASPECTS DU PHÉNOMÈNE DE FUSION.

a) **Fusion franche.** — Chauffons lentement du naphtalène, de la paraffine, du plomb, etc. Ces corps, dont la température s'élève graduellement, ne changent ni d'aspect, ni de consistance jusqu'à un instant où nous voyons tout à coup apparaître *brusquement* la première goutte de liquide. Le solide subit la fusion *brusque* ou **fusion franche.**

---

(1) La *fusion* et la *solidification* n'étant pas explicitement au programme, on pourra se contenter d'une lecture permettant de comprendre et de retenir les *lois* et *définitions*, qui paraissent indispensables pour les classes ultérieures.

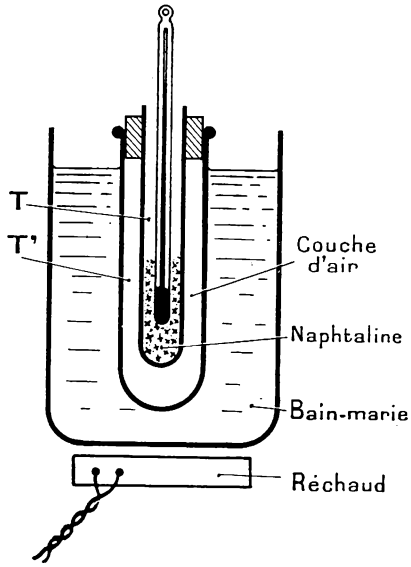


FIG. 2. — *Étude expérimentale de la fusion.*

b) **Fusion pâteuse.** — Chauffons un morceau de cire, de beurre, de fer, de verre... A partir d'une certaine température, difficile à déterminer pour chacune de ces substances et d'ailleurs variable de l'une à l'autre, nous constatons un ramollissement.

Nous observons un passage *insensible* de l'état solide à l'état liquide, par l'intermédiaire de toute une série d'états plus ou moins *visqueux*. On dit qu'il y a **fusion pâteuse.**

c) Certains corps ne fondent qu'à des températures très élevées (au four électrique); on les dit *réfractaires* (silice, carbone, tungstène).

d) D'autres, chauffés, *se décomposent* avant de fondre (le bois, la craie...).

Nous nous proposons d'étudier seulement la fusion franche; c'est le cas le plus simple, que présentent les corps **purs** cristallisés. Ces mêmes corps subissent le phénomène inverse : solidification franche.

2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.

1) **Fusion.** — Chauffons un corps **pur :** le naphtalène.

Plaçons des fragments de naphtalène dans un *tube à essais* T (fig. 2). Le tube T sera entouré d'un deuxième tube de plus grand diamètre T', de façon à ménager une *couche d'air* destinée à régulariser l'échauffement et à le rendre moins rapide. Un *thermomètre* permettra de suivre la température du naphtalène. Le chauffage se fera au *bain-marie.*

Notons les indications du thermomètre de minute en minute et portons-les sur un graphique en ordonnées, les temps étant portés en abscisses (fig. 3).

Le phénomène comprend trois phases.

1° Partis de la température ambiante (+ 15° C), nous notons un *échauffement progressif du solide* jusqu'à la température + 80 °C (courbe AB).

2° Dès que la température de + 80 °C est atteinte, une goutte de liquide apparaît. La *fusion franche commence alors et continue,* la température ***restant fixe*** à + 80° C tant qu'il reste une parcelle solide à fondre (palier BC).

3° Quand tout le solide est passé à l'état liquide, on note un *échauffement progressif du liquide* (courbe CD).

Le graphique résume toutes ces observations. La droite BC porte le nom de **palier de fusion;** la température + 80 °C est appelée **point de fusion** du naphtalène.

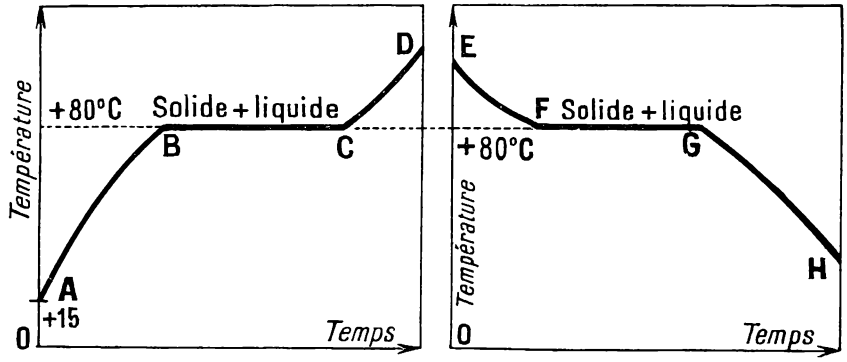


FIG. 3. — *Les lois de la fusion.*

***2)* Solidification.** — Enlevons du bain-marie le tube T′ et son contenu (naphtalène fondu à la température de 85 °C ou 90 °C) et laissons lentement *refroidir* le liquide en abandonnant T′ à l'air ambiant. Notons de nouveau les températures de minute en minute et construisons le graphique (fig. 3).

1° Nous observons tout d'abord un *refroidissement du liquide* jusqu'à + 80 °C (courbe EF).

2° A + 80 °C apparaissent les premiers cristaux de naphtalène solide, et la *solidification se poursuit*, la température ***restant fixe*** à + 80° C, tant qu'il reste une goutte de liquide à solidifier (palier FG).

3° Puis nous observons le *refroidissement du solide* (courbe GH).

La droite FG est le **palier de solidification;** la température + 80 °C est appelée **point de solidification** du naphtalène.

Tous les corps dits **purs,** soumis à l'expérience, fournissent des résultats analogues au naphtalène, ce qui nous conduit à énoncer les lois de la fusion et de la solidification :

3. LOIS DE LA FUSION ET DE LA SOLIDIFICATION.

1° ***Sous une même pression, un corps* pur *solide commence toujours à fondre à la même température.***

2° ***Sous une même pression, un corps* pur *liquide commence toujours à se solidifier à la même température.***

3° ***Sous une même pression, la température de fusion et la température de solidification sont identiques.***

4° ***Sous une même pression, la température de fusion et la température de solidification* restent fixes *pendant la durée de ces phénomènes.***

Point de fusion. — Les expériences précédentes sont faites à la pression atmosphérique ordinaire. Nous verrons (§ 6) que les résultats seraient très légèrement différents sous des pressions différentes. On peut dire toutefois que dans les faibles limites de variation de la pression atmosphérique la température de fusion d'un corps pur est invariable. On l'appelle son ***point de fusion.***

Voici les points de fusion de quelques corps :

POINTS DE FUSION (en degrés Celsius)

Hydrogène	— 259°	Phosphore	+ 44°
Oxygène	— 218°	Soufre	+ 115°
Azote	— 210°	Plomb	+ 327°
Alcool	environ — 130°	Aluminium	+ 658°
Mercure	— 39°	Cuivre	+ 1 083°
Eau (par définition)	**0°**	Tungstène	+ 3 100°

Le point de fusion, caractéristique de chaque corps pur (1), peut donc servir à l'identifier; on dit que c'est une de ses *constantes physiques* ou un *critère de pureté.*

B. PHÉNOMÈNES ACCOMPAGNANT LA FUSION

4. CHALEUR DE FUSION. — Observons le graphique de la figure 3. Pendant toute la durée de la fusion, nous n'avons cessé d'apporter des calories au mélange solide-liquide et cependant la température est restée *fixe;* c'est donc que le ***phénomène de la fusion absorbe de la chaleur.***

a) **Définition :** ***La chaleur de fusion d'un corps pur est le*** **nombre de calories** ***qu'il faut fournir à l'unité de masse de ce corps, amené à son point de fusion, pour le faire passer, à température constante, de l'état solide à l'état liquide.***

Ainsi 1 g de glace à 0°C exige 80 cal. environ pour se transformer en 1 g d'eau à cette température.

Inversement, l'expérience montre que 1 g d'eau liquide qui se solidifie à 0° restitue 80 cal., ce qui est en accord avec le Principe des transformations inverses (Leçon 23, § 6).

b) **Mesures. Résultats.** — Une chaleur de fusion peut être mesurée par la méthode habituelle *des mélanges* (T. P.). Le tableau suivant indique quelques résultats :

---

(1) Un corps *pur* est appelé également par les Chimistes : *espèce chimique définie*, par opposition aux simples mélanges (voir *Cours de Chimie*). Un mélange n'a pas de point de fusion fixe.

CHALEUR DE FUSION (en cal/g)

Glace	≃ 80		
Aluminium	80		
Argent	25	Soufre	10
Anhydride carbonique	44	Plomb	5,4
Benzène	30	Phosphore	4,7
Glycérine	42	Mercure	2,8
Naphtalène	35		

On remarque que la *glace* a une chaleur de fusion notablement *plus élevée que* celle des autres substances.

Cette grande chaleur de fusion explique pourquoi un bloc de glace est un excellent agent réfrigérant. Empruntant pour devenir liquide beaucoup de calories au milieu qui l'environne, il peut maintenir longtemps une température basse.

Malgré l'énorme quantité de chaleur qu'il envoie sur les glaciers, le soleil ne parvient pas à les fondre.

5. VARIATION DE VOLUME PENDANT LA FUSION ET LA SOLIDIFICATION.

a) *CAS GÉNÉRAL.* — Fondons de l'étain dans un creuset ($t_f = 232^o$), puis laissons refroidir l'étain liquide jusqu'à solidification. Nous obtenons un bloc présentant un *creux* (fig. 4).

Le niveau de l'étain liquide était le plan horizontal *ab*. La solidification s'est donc accompagnée d'une **diminution de volume.** Inversement, lors de la fusion, le niveau de l'étain liquide revient en *ab*.

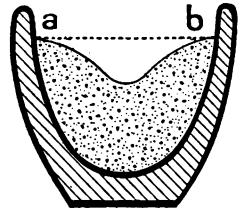


FIG. 4. — *En général, les corps diminuent de volume par solidification.*

En général, les corps augmentent de volume en fondant. Comme la masse d'un corps ne varie évidemment pas pendant le changement d'état, on en déduit que la masse volumique diminue pendant la fusion. La vérification est facile : quand le naphtalène, le soufre, le plomb... fondent, le solide, surmonté du liquide, reste toujours *au fond* du récipient.

b) *EXCEPTIONS.* — **Quelques substances** (argent, bismuth, eau...) **augmentent au contraire de volume** en passant à l'état solide. Le cas de l'eau est particulièrement important.

1 000 cm³ d'eau liquide à 0 °C donnent 1 090 cm³ d'eau solide à 0 °C. Chacun a remarqué que la glace flotte sur l'eau, ce qui indique que sa masse volumique est *inférieure* à 1 g/cm³.

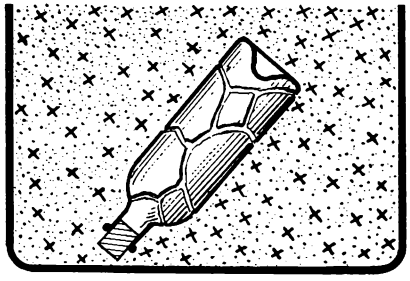


FIG. 5. — *L'eau augmente de volume en se solidifiant.*

Cette augmentation de volume lors de la solidification de l'eau peut être aisément mise en évidence en plongeant une bouteille complètement remplie d'eau et bien bouchée dans un mélange réfrigérant (glace et sel marin). L'énorme pression exercée par l'eau pendant la solidification, avec augmentation de volume brise les parois de la bouteille (fig. 5). On sait qu'en hiver l'eau immobile dans les canalisations provoque la rupture de celles-ci en se solidifiant.

La gelée est aussi responsable de l'éclatement de certaines roches (« geler à pierres fendre »), de la détérioration des radiateurs d'automobiles. Dans ce dernier cas, en incorporant à l'eau de l'alcool ou de la glycérine, on obtient un *mélange* qui *commence* à se solidifier à une température très inférieure à 0 °C (antigel).

6. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA TEMPÉRATURE DE FUSION. — En général la température de fusion s'*élève* quand on *augmente la pression* que supporte le corps que l'on veut fondre, mais la pression doit être très élevée pour avoir un effet appréciable.

Une *exception* à cette règle générale est le ***cas de l'eau,*** *dont la température de fusion s'abaisse quand on élève la pression.* Il en résulte quelques conséquences importantes :

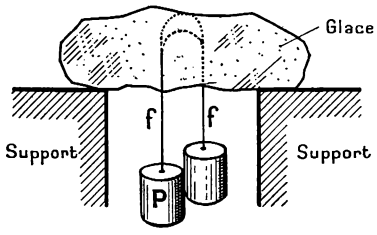


FIG. 6. — *Regel de la glace.*

α) **Regel. Plasticité de la glace :** *Expérience.* — Un bloc de glace étant maintenu par deux supports, faisons-le chevaucher par un *fil métallique très fin* **f** fortement tendu par deux poids P. Peu à peu le fil pénètre dans la glace qui se reforme derrière lui, si bien que le bloc, *entièrement traversé,* se retrouve cependant *intact* à la fin de l'expérience (fig. 6).

Le fil exerce au-dessous de lui une pression d'autant plus forte qu'il est plus fin et que les poids P sont plus importants. Sous cette forte pression, la glace possède une température de fusion *inférieure* à 0 °C. Comme le bloc est dans son ensemble à une température de 0 °C, la partie comprimée ne peut subsister à l'état solide à 0 °C; elle *fond.*

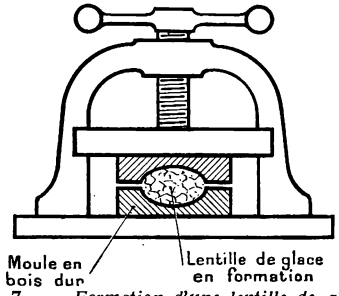


FIG. 7. — *Formation d'une lentille de glace.*

L'eau liquide provenant de cette fusion passe au-dessus du fil où elle se retrouve à la

pression atmosphérique et à 0 °C; elle se congèle de nouveau. Il faut pour cela qu'elle puisse abandonner 80 calories par gramme. Elle les cède à la glace en train de fondre au-dessous du fil. Celui-ci doit donc être bon conducteur de la chaleur (métal). L'expérience vérifie d'ailleurs qu'un fil de *chanvre*, mauvais conducteur de la chaleur, ne traverse pas le bloc de glace.

Lentille de glace. — Dans un moule en bois dur (hêtre, buis) comprimons fortement de petits fragments de glace pilée à l'aide d'une presse à copier (fig. 7).

En démoulant, nous obtenons une lentille de glace. Les morceaux, soumis à une grande pression, fondent au contact les uns des autres, puis, l'eau formée se recongelant, se soudent quand on supprime la pression.

Cette plasticité de la glace s'observe au passage de lourds véhicules sur les routes enneigées ou verglassées. Quand la température de la surface solide est 0 °C, une très forte pression momentanée des roues fait fondre la glace qui se solidifie aussitôt après, donnant une croûte continue. On l'a proposée également pour expliquer certains caractères de la marche lente des glaciers.

β) **Le point thermométrique 0°C.** — Nous avons vu (Leçon 19, §§ 3 et 4) que le point zéro de l'échelle thermométrique Celsius était défini sans tenir compte de la pression.

Au-dessus de la pression atmosphérique normale, une augmentation de pression de 9 atmosphères abaisse seulement de 0,075° la température de fusion de la glace. Comme il y a à peu près proportionnalité entre ces variations, une variation de 3 cm de mercure (très rarement observée) modifie le point de fusion d'environ

$$\Delta t = \frac{0{,}075 \times 3}{9 \times 76} \simeq \frac{1}{3\,000}\,°.$$

Dans la définition du point *zéro*, et dans la graduation d'un thermomètre, il est tout à fait légitime de ne pas en tenir compte.

EXERCICES

1. Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à 20 g d'aluminium, pris à 20 °C, pour amener ce métal à 720 °C. On prendra les données nécessaires dans le Cours et on les supposera indépendantes de la température. Rép. : $Q \simeq 4\,680$ cal.

2. Dans 50 g d'eau à 50 °C on met 50 g de glace à 0 °C. Quelle est le masse de glace qui reste après fusion? Rép. : 18,75 g.

3. On met en présence dans un calorimètre 1 000 g d'eau à 10 °C et 1 000 g de glace à — 10 °C. Quel est l'état final du mélange et sa température? Rép. : 937,5 g de glace et 1 062,5 g d'eau à 0 °C.

4. Un kilogramme d'eau donne en se solidifiant 1 090 cm³ de glace. Quelle est la densité de la glace? Rép. : $d \simeq 0{,}92$.

5. Une glacière consomme 2,160 kg de glace par jour. Quel est le nombre de calories reçues du milieu extérieur par seconde? Rép. : 2 cal.

6. Sous quelle pression la glace fond-elle à — 0,5 °C? Rép. : 61 atm.

7. Dans une pièce à 15 °C on veut amener à 4 °C 1 *l* d'eau dans une carafe. Quelle masse minimum de glace à 0 °C faut-il employer? Rép. : $p = 131$ g.

8. Un morceau de glace de masse 40 g, à 0 °C, est placé avec 20 g de cuivre à 100 °C dans un calorimètre contenant 180 g d'eau à 20 °C et dont les accessoires ont une valeur en eau égale à 20 g. Quel est l'état final du mélange (état physique de l'eau et température?) Chaleur massique du cuivre : 0.09 cal/g.°. Rép. : Eau liquide : 220 g; $t = 4$ °C.

PROBLÈMES

1. Dans un calorimètre de cuivre de masse 100 g et contenant 200 g d'eau à 4 °C, on introduit 300 g de cuivre à — 20 °C. On agite jusqu'à ce que la température soit uniforme.

1° Quelle est la température finale?

2° Montrer que si le cuivre introduit dans le calorimètre est à la température de — 50 °C, une partie de l'eau se congèle.

3° Calculer la masse d'eau congelée.

Chaleur massique du cuivre : 0,095.
Chaleur de fusion de la glace : 80 calories.
(*Bacc.* Rennes, 1947.)

2. Un bloc de métal de 1 kg, de chaleur massique 0,10, présente une cavité où l'on peut placer des liquides, des solides, un thermomètre.

1° Le métal est d'abord à la température de l'eau bouillante (100°). On introduit dans la cavité un mélange fait à l'avance de x g de glace pilée et de y g d'eau liquide. On demande la température finale dans les trois cas suivants :

Premier cas : $x = y = 50$ g;

Deuxième cas : $x = 125$ g; y est arbitraire;

Troisième cas : $x = 200$ g; y est arbitraire.

On admettra que, pour transformer à 0 °C 1 g de glace en 1 g d'eau liquide, faut lui fournir 80 calories.

2° Le bloc métallique étant à la température + 30 °C, on introduit dans sa cavité 3 kg de mercure à la température — 30 °C. La température finale est 0 °C. Quelle est, d'après cela, la chaleur massique du mercure?
(*Bacc.*, Strasbourg, 1946.)

3. 1° Un cube de glace de 100 g flotte dans un vase calorimétrique contenant 1 000 cm² d'eau liquide à 0 °C. Quel est le volume de la partie émergée? Quelle masse faudra-t-il poser sur la face supérieure du cube pour l'immerger complètement? — Masse volumique de la glace : 0,92 g/cm³.

2° On porte dans le calorimètre un bloc métallique de 300 g retiré du four à la température t. On constate que finalement le cube de glace est fondu et que la température de l'eau est 0,5 °C.

Quelle était la température du four?

Chaleur massique du métal : 0,1 cal/g. Chaleur massique du vase calorimétrique : 0,1 cal/g. Masse du vase : 200 g.

On sait que la glace fond à température constante et que la fusion de 1 g de glace à 0 °C correspond à l'absorption de 80 calories (chaleur de fusion).
(*Bacc.*, Dijon, 1946.)

TRAVAUX PRATIQUES

N° 25. Fusion et solidification. ***N° 26. Chaleur de fusion de la glace.***

LECTURE

Le regel de la glace.

Mettez dans un moule convenable une masse compacte de glace, et soumettez-la à une forte pression : elle se brise en morceaux. Comprimez alors fortement ces morceaux; ils se réunissent par regel, et vous retirez de la presse une masse de glace compacte, qui diffère entièrement de la première par ses formes. Pour obtenir ce résultat, il faut opérer sur de la glace fondante. Quand la température de la glace est beaucoup plus basse que celle de la glace fondante, la pression ne la transforme pas en une masse translucide d'une autre forme, mais bien en poudre blanche.

En employant des moules convenables, on peut ainsi changer à volonté la forme de la glace, et obtenir des sphères, des coupes, des anneaux, des câbles de cette substance; le changement de formes s'opère, dans tous les cas, par voie de broiement et de regel.

. . . . . .

La pression abaisse le point de congélation de l'eau. — Nous pouvons, pour notre propre instruction, produire la liquéfaction de la glace par la pression de la manière suivante : vous n'avez pas oublié les belles fleurs qu'on obtient en faisant passer un rayon de soleil à travers de la glace de lac, et vous vous rappelez que les fleurs se forment toujours parallèlement à la surface de congélation. Taillons un prisme, ou une petite colonne de glace, de manière que les plans de congélation le coupent à angle droit; mettons ce prisme entre deux planchettes, et comprimons-le avec précaution, à l'aide d'une petite presse hydraulique.

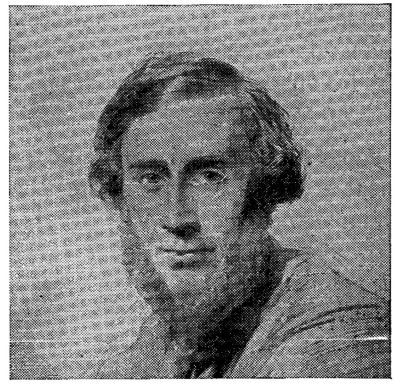
Il est bon de concentrer sur le morceau de glace une lumière assez vive, au moyen d'un miroir concave, et de l'examiner à la loupe. Vous voyez déjà le résultat : dans la substance même de la glace, il se forme des surfaces troubles, qui gagnent peu à peu en étendue si l'on augmente lentement la pression. Çà et là, vous apercevez quelque chose qui ressemble à une cristallisation; on dirait que les feuilles de fougère parcourent la glace avec une grande rapidité, et, si vous en regardez attentivement les pointes et les bords, vous y constatez un mouvement fort appréciable. Ces surfaces troubles sont des espaces de liquéfaction, et le mouvement que vous voyez est celui de la glace qui se transforme en eau sous la pression. Cette eau est plus froide que ne l'était la glace avant d'être comprimée; et, si la pression cesse, non seulement la liquéfaction s'arrête, mais encore l'eau se regèle. Le poids produit par la liquéfaction de la glace sous l'action de la pression suffit pour regeler l'eau dès que la pression a cessé.

Si, au lieu de distribuer la première sur des surfaces d'une étendue considérable, nous a concentrons sur une petite surface, la liquéfaction sera nécessairement plus rapide, et c'est là ce que M. Bottomley a fait tout récemment dans une expérience singulièrement belle et intéressante. Appuyons sur des blocs de bois les deux extrémités d'une barre de glace de 25 cm de long sur 10 d'épaisseur et 7 de large, et faisons passer sur le milieu de cette barre un fil de cuivre de 1 ou 2 mm de diamètre. Si nous réunissons les deux extrémités de ce fil, et que nous y suspendions un poids de 6 ou 7 kg, toute la pression exercée par ce poids portera sur la glace que soutient le fil. Qu'en résulte-t-il? La glace qui est sous le fil se liquéfie; l'eau de liquéfaction s'échappe autour du fil, mais dès qu'elle n'est plus soumise à la pression, elle se congèle, de sorte que tout autour du fil, même avant qu'il n'ait pénétré dans la glace, il se forme une enveloppe de glace. Le fil continue à pénétrer dans la glace; l'eau s'échappe sans cesse, et, à mesure, se congèle derrière le fil. Au bout d'une demi-heure, le poids tombe; le fil a traversé la glace dans toute son épaisseur. On voit nettement la trace de son passage mais les deux morceaux de la barre de glace se sont ressoudés si solidement que le nouveau morceau cassera sur tout autre point aussi bien qu'à la surface du regel.

. . . . . .

Les substances qui se dilatent en se solidifiant sont les seules qui se comportent ainsi. Le bismuth, nous le savons, ressemble à l'eau sous ce rapport; au contraire, pour le plomb, la cire, le soufre, qui se contractent en passant à l'état solide, le point de fusion *remonte* sous l'influence de la pression.

G. TYNDALL (1).



TYNDALL.

(1) Conférence faite en 1871 à l'Institution royale de Londres.

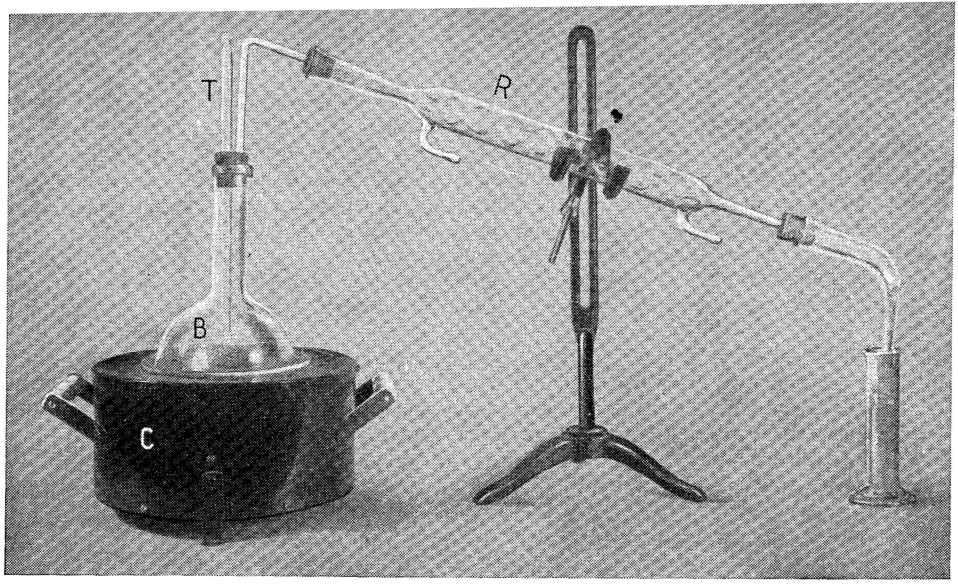


Photo Hatier.

FIG. 1. — **Un appareil à distillation simple. B :** *Ballon à distillation,* **T :** *thermomètre,* **R :** *réfrigérant,* **C :** *chauffe-ballon électrique. Dans la distillation on assiste simultanément aux deux phénomènes inverses vaporisation et liquéfaction.*

25. VAPORISATION ET LIQUÉFACTION

A. GÉNÉRALITÉS. DÉFINITIONS

1. — On appelle **vaporisation** le passage de l'état *liquide* à l'état *gazeux.*

Ce changement d'état physique peut revêtir différents aspects :

1. **Vaporisation en espace limité.** — Dans ce cas, le liquide se transforme en gaz dans un récipient *clos,* sans communication possible avec l'extérieur.

a) Si le volume limité était initialement *vide de tout gaz* (chambre barométrique par exemple), on est en présence du phénomène de **vaporisation dans le vide.**

b) Si le volume limité contenait primitivement *un autre gaz* (flacon bouché contenant de l'air), on assite à la **vaporisation en atmosphère limitée.**

2. **Vaporisation en espace illimité.** — Le gaz provenant du liquide peut se répandre librement et les molécules gazeuses s'éloigner indéfiniment des molécules liquides qui leur donnent naissance.

a) Si la vaporisation se fait uniquement *par la surface* de séparation du liquide et de l'air ambiant, on assiste à l'**évaporation** (évaporation lente de l'eau abandonnée dans une soucoupe).

b) Si la vaporisation se fait *au sein du liquide,* on est en présence de l'**ébullition** (ébullition tumultueuse de l'eau dans un ballon).

L'évaporation, phénomène familier, nous montre une différence frappante entre la vaporisation et la fusion des corps. Le passage de l'état solide à l'état liquide sous une pression donnée, s'effectue *à une seule température* qui est fixe (température de fusion);

le passage de l'état liquide à l'état gazeux peut se faire, par évaporation, *à toute température* sous une même pression. Le schéma suivant résume les 4 modes de vaporisation faisant passer le liquide ***L*** à l'état de gaz ***G***.

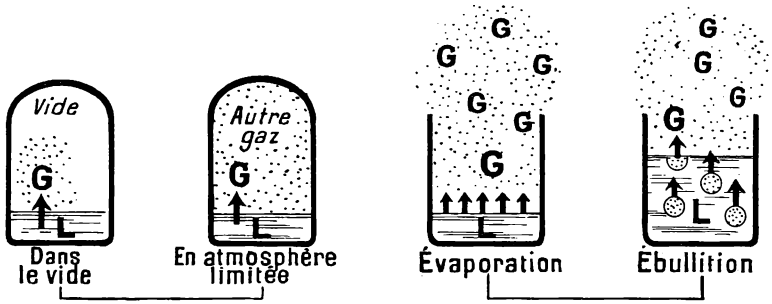


FIG. 2.

B. VAPORISATION EN ESPACE LIMITÉ DANS LE VIDE

2. EXPÉRIENCE. EXISTENCE DE LA VAPEUR SÈCHE. — Soient deux tubes barométriques A et B, assez longs, renversés sur la cuve à mercure, dans lesquels le mercure se fixe au même niveau *ab* (fig. 3). A l'aide d'une seringue à aiguille recourbée S, introduisons *très peu* d'éther (une goutte) sous l'orifice de B. L'éther s'échappe de l'aiguille, monte, et quand il atteint le sommet de la colonne mercurielle nous assistons à un phénomène *très rapide* :

a) Le niveau du mercure s'*abaisse brusquement* et se fixe en *b'*.

b) En même temps l'éther, *instantanément vaporisé, remplit* de sa vapeur la chambre barométrique *sans qu'il soit possible de déceler la moindre trace d'éther liquide.*

On dit qu'on est en présence de la ***vapeur sèche.***

La dénivellation *h* entre le mercure du tube témoin A et celui de B mesure la *pression* de cette vapeur sèche.

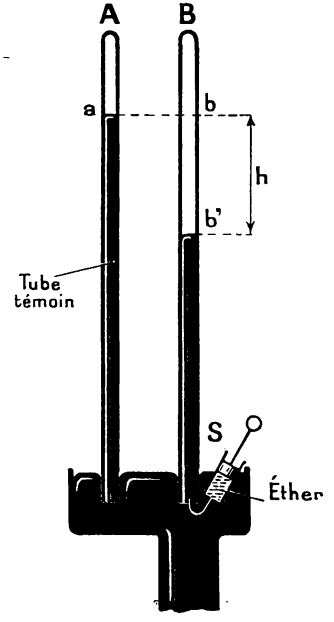


FIG. 3. — *Obtention d'une vapeur sèche.*

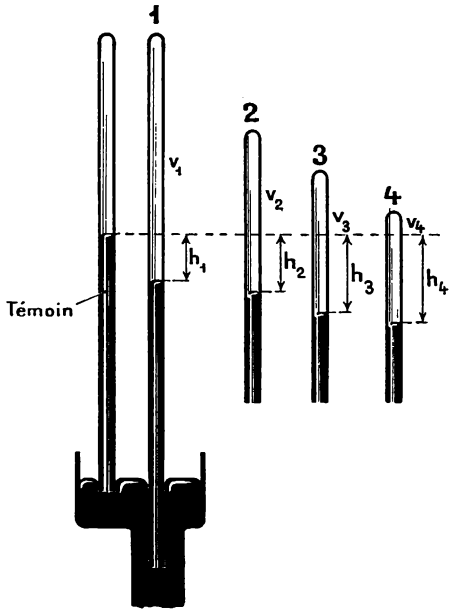


FIG. 4. — *Les vapeurs sèches suivent la loi de Mariotte.*

On peut répéter l'expérience avec d'autres liquides (eau, alcool, benzène, etc.). Tous les liquides peuvent être amenés à l'état de vapeur sèche.

3. PROPRIÉTÉS DES VAPEURS SÈCHES. — 1. **Loi de Mariotte.** — Opérons dans une salle à température constante.

Le tube B étant disposé sur une cuve profonde remplie de mercure, enfonçons-le en lui donnant les positions 1, 2, 3, 4... (fig. 4). Mesurons dans chacune de ces positions les volumes v_1, v_2, v_3, v_4... et les pressions : h_1, h_2, h_3, h_4...

Aux erreurs d'expériences près, ***les produits*** $h_1 \times v_1$, $h_2 \times v_2$, $h_3 \times v_3$, $h_4 \times v_4$... ***sont égaux.***

Les vapeurs sèches suivent donc la loi de Mariotte.

2. **Lois de Gay-Lussac et de Charles.** — Des expériences analogues à celles que nous avons décrites au chapitre 21 montrent que *les vapeurs sèchent suivent les lois de Gay-Lussac et de Charles.*

En résumé, ***les vapeurs sèches suivent les lois des gaz.***

Remarque. — Les mots *gaz* et *vapeur sèche* ont-ils donc la même signification physique? Il semble que oui. Cependant les vapeurs sèches — l'exemple concret que nous avons choisi le montre bien — sont proches de leurs conditions de liquéfaction. Elles s'éloignent beaucoup de l'état de gaz parfait et ne suivent qu'*imparfaitement* les lois des gaz. Quand, dans le langage, on emploie indifféremment les mots *gaz* et *vapeur*, il s'agit toujours de vapeur *sèche*.

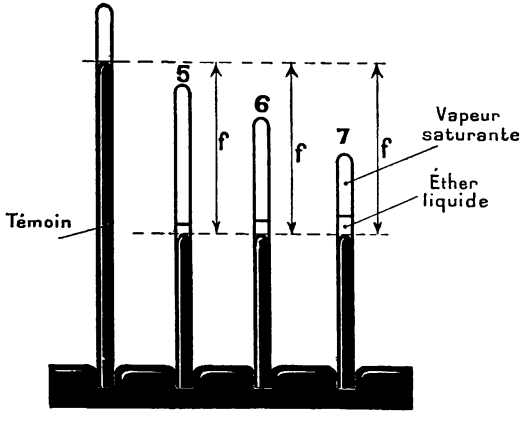


FIG. 5. — *Obtention d'une vapeur saturante.*

4. VAPEUR SATURANTE. — Poursuivons l'expérience schématisée par la figure 3 en enfonçant de plus en plus le tube B dans la cuve profonde. Pour une certaine position, *une goutte de liquide apparaît au-dessus du mercure* (position 5, fig. 5). A partir de ce moment, nous sommes en présence *d'éther liquide au contact de sa vapeur.* Cette vapeur est dite : ***vapeur saturante.***

Si nous enfonçons encore davantage le tube B, nous voyons que le volume de l'éther *liquide* augmente (positions 6, 7...), mais la pression ***f*** de la vapeur saturante *reste fixe tant qu'il y a de l'éther liquide* en présence de sa vapeur.

La pression ***f*** est donc la plus grande que puisse supporter la vapeur. On l'appelle : ***pression maximum*** de vapeur.

Tous les liquides peuvent ainsi être amenés à l'état de vapeur saturante. A chaque corps pur correspond une pression maximum de vapeur, fixe pour une température fixe.

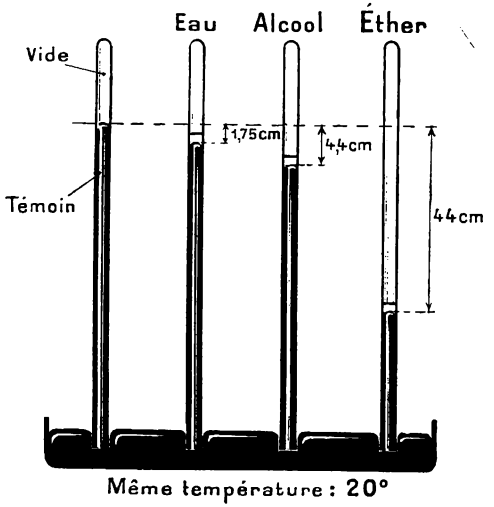


FIG. 6. — *La pression maximum, à une même température, dépend du corps pur.*

5. INFLUENCE DE LA NATURE DU CORPS PUR. — Groupons sur une même cuve à mercure plusieurs tubes barométriques dans lesquels, à l'aide d'une seringue, nous introduisons des liquides différents, chacun en quantité suffisante pour obtenir la vapeur saturante (fig. 6). A la température de la salle, la même pour tous les tubes, nous notons des pressions maxima différentes.

Pour une température de 20° C, nous pouvons mesurer :

$f_{(eau)}$	1,75 cm	de mercure
$f_{(alcool)}$	4,4	— —
$f_{(éther)}$	44	— —

La pression maximum de vapeur dépend donc de la nature du corps pur. Les liquides qui, à la température ordinaire, ont une pression maximum notable, sont dits ***volatils***. L'éther est très volatil.

6. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE.

a) **Expérience qualitative.**

Entourons le tube contenant la vapeur saturante d'éther d'un manchon de drap mouillé d'eau tiède (température inférieure à 35°) (fig. 7). Aussitôt, nous voyons le mercure descendre dans le tube.

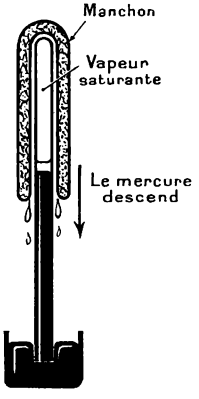


FIG. 7.

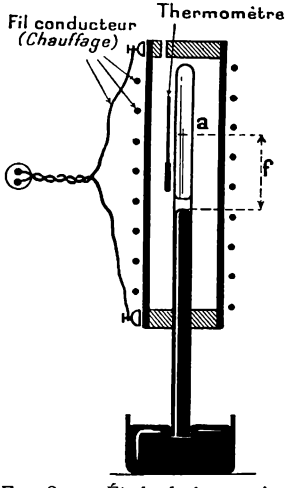


FIG. 8. — *Étude de la pression maximum de l'eau à différentes températures.*

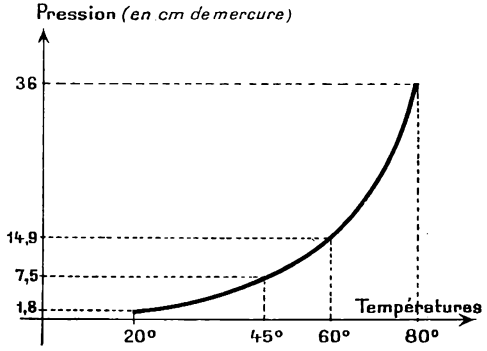


FIG. 9. — *La pression maximum de la vapeur d'eau saturante est une fonction croissante de la température.*

La pression maximum *augmente quand la température s'élève.*

b) **Expérience quantitative : courbe de vaporisation.** — Dans un tube barométrique gradué, introduisons, au-dessus du mercure dont le niveau initial est en **a**, de *l'eau*, dont une partie se transforme aussitôt en vapeur saturante. Chauffons très lentement et très régulièrement cette vapeur grâce au dispositif représenté sur la figure 8.

Notons, pour chaque température indiquée par le thermomètre, la pression maximum *f* correspondante. Nous pourrons alors construire la courbe représentant le phénomène dans un certain intervalle de température (fig. 9).

Par des méthodes beaucoup plus précises, on a pu mesurer les pressions maxima de vapeur entre des limites beaucoup plus larges de la température.

Les résultats sont rassemblés sur la figure 10; les pressions ont été indiquées en *atmosphères.*

On voit qu'à la température de 100 °C, la pression est égale à 1 atm. (pression atmosphérique).

On remarque également que dès que la température dépasse 100°, la pression maximum prend rapidement de très grandes valeurs.

On a cherché entre P et *t* une relation qui traduise bien les résultats expérimentaux (équation de la courbe). La plus simple est la formule de *Duperray :*

$$P_{\text{atmosphères}} = \left(\frac{t^{\circ}}{100}\right)^{4}$$

t° étant la température *Celsius* de la vapeur saturante. Cette relation représente convenablement les phénomènes entre 100 °C et 250 °C.

Dans l'expérience précédente, nous avions construit (fig. 9) seulement la portion ***ab*** du

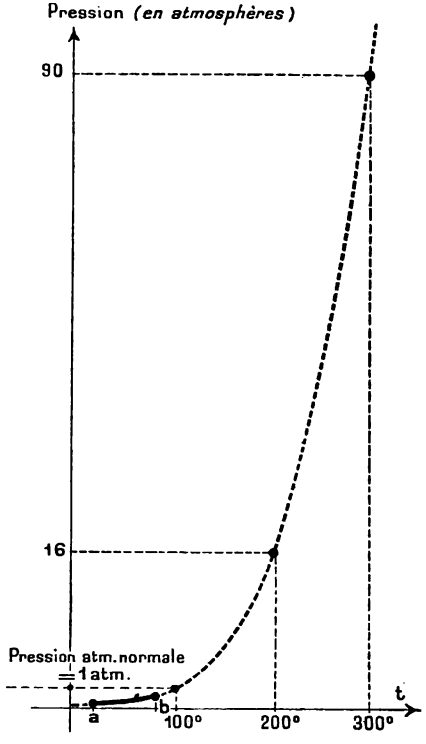


FIG. 10. — *Courbe de vaporisation de l'eau.*

graphique correspondant aux températures comprises entre 20 °C et 80 °C.

Cette courbe est appelée **courbe de vaporisation.** A chaque corps pur correspond une courbe de vaporisation particulière. Dans tous les cas, on constate que la pression maximum augmente très rapidement quand la température s'élève. La figure 11 donne l'aspect de ces courbes, tracées à la même échelle, pour l'*eau*, l'*alcool*, l'*éther*.

Nous y retrouvons les résultats déjà indiqués par ces trois corps purs à la température de 20 °C.

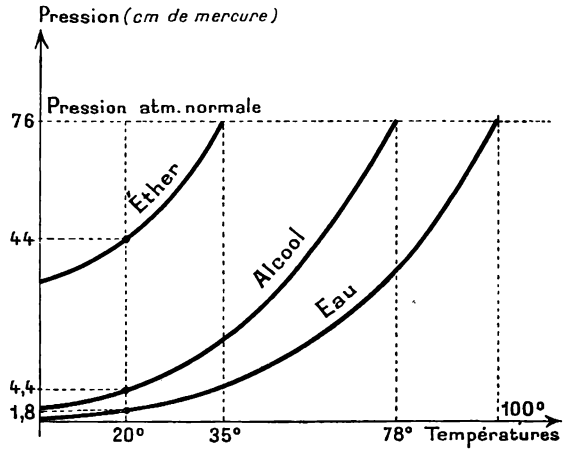


FIG. 11.
Courbe de vaporisation de différents corps purs.

Remarque : La pression maximum de vapeur saturante du **mercure** est très faible (0,0012 mm Hg à 20 °C, 0,27 mm Hg à 100 °C).

Dans les baromètres et manomètres à mercure, utilisés presque toujours à la température ordinaire, elle est absolument négligeable.

Dans les thermomètres, le mercure peut être porté très souvent à une température supérieure à 100 °C. La correction à apporter à l'indication du thermomètre est très faible, et toujours négligée dans les mesures ordinaires.

Il en est de même, évidemment, dans toute expérience quantitative de précision moyenne comme celle décrite au § 6 par exemple.

C. VAPORISATION EN ATMOSPHÈRE LIMITÉE

7. EXPÉRIENCE (fig. 12, *a*). — Prenons une **colonne** ou éprouvette à tubulure latérale inférieure et introduisons du mercure jusqu'au-dessus de cette tubulure, bien bouchée par le bouchon *b*. L'orifice supérieur est fermé par le bouchon B, traversé par un tube vertical A qui plonge dans le mercure. Le bouchon *b* est lui-même traversé par l'aiguille creuse d'une *seringue* S. L'espace E étant rempli d'air à la pression atmosphérique, les niveaux du mercure dans le tube A et dans E sont les mêmes.

A l'aide de la seringue, *injectons un peu d'éther dans E*. Ce liquide monte à la surface du mercure et se vaporise **lentement** pendant que le mercure **monte** dans le tube A. Au bout d'un moment la vaporisation s'arrête; il reste de l'éther sur le mercure, et celui-ci se fixe dans le tube A à une hauteur *h* au-dessus du niveau de l'éprouvette. L'éther est alors à l'état de vapeur saturante dans une

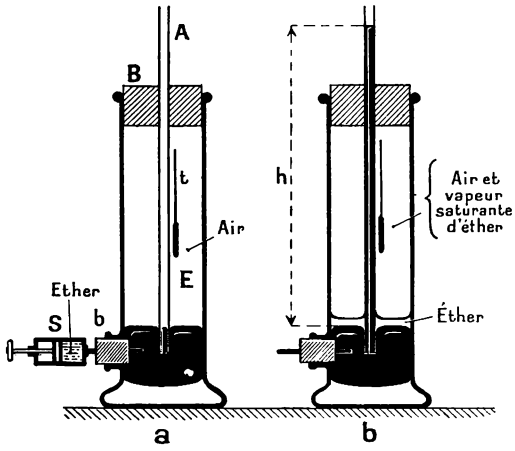


FIG. 12. — *Vaporisation en atmosphère limitée.*

atmosphère d'air limitée au volume intérieur de l'éprouvette.

Lisons alors la température au thermomètre *t* et cherchons sur la courbe de vaporisation de l'éther la pression maximum correspondant à cette température. Nous trouvons qu'elle est précisément égale à *h* cm de mercure.

Conclusions :

a) La vaporisation dans une enceinte limitée contenant déjà un gaz s'opère lentement et non instantanément comme dans le vide.

b) *La pression maximum d'une vapeur en présence d'un gaz est la même que dans le vide à la même température.*

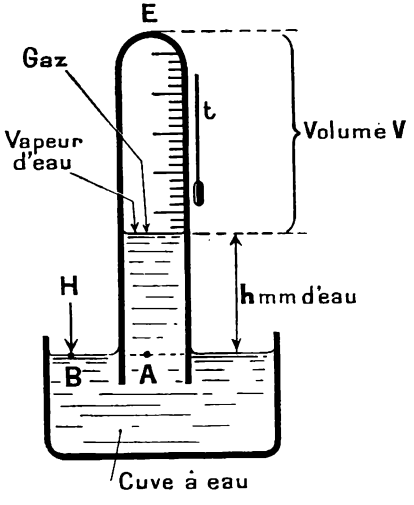


FIG. 13. — Problème : *un volume V de gaz est recueilli sur la cuve à eau, à la température t; la pression atmosphérique est* H, *et on observe une dénivellation* h *entre le niveau dans l'éprouvette et dans la cuve. Quelle est la masse du gaz?*

Application. — Masse d'un certain volume de gaz recueilli sur la cuve à eau. — On a souvent à résoudre le problème suivant : *Un gaz est recueilli dans une éprouvette retournée sur la cuve à eau. On mesure son volume* V. *En déduire sa masse.*

Soit l'éprouvette E contenant le gaz (fig. 13) et soit *h* mm la hauteur de l'eau dans l'éprouvette, au-dessus de l'eau de la cuve.

Revenons à la relation déjà établie au paragraphe 9 de la Leçon 22 :

$$m = a_{0,76} . d . V . \frac{Pe}{760} \cdot \frac{273}{T} \qquad [1]$$

dans laquelle Pe est la *pression effective* du gaz dans les conditions réalisées.

Ici l'éprouvette contient le gaz et de l'eau à l'état de vapeur saturante, vaporisée dans l'atmosphère gazeuse limitée.

Soit Pe la pression du gaz, *f* la pression maximum de la vapeur d'eau à la température *t* à laquelle on mesure le volume V.

Les deux points A et B dans le même plan horizontal de l'eau en équilibre supportent les mêmes pressions. Or :

Pression en B = pression atmosphérique = H (en mm de mercure).

Pression en A $= \frac{h}{13,6}$ (mm de mercure) + Pe (mm de mercure) + f (en mm de mercure).

d'où :

$$Pe = H - \frac{h}{13,6} - f \text{ mm de mercure.}$$

La relation [1] devient donc :

$$m = a_{0,76} \cdot d \cdot V \cdot \frac{H - \frac{h}{13,6} - f}{760} \cdot \frac{273}{T} \cdot$$

Remarque. — Si le niveau de l'eau dans l'éprouvette est au-dessous du niveau de la cuve, le terme $-\frac{h}{13,6}$ doit être remplacé par $+\frac{h}{13,6}$.

D. ÉVAPORATION

8. — L'évaporation est la vaporisation lente d'un liquide par sa surface en contact avec l'atmosphère.

Quelques expériences simples vont confirmer nos observations journalières sur la vitesse d'évaporation, qui dépend de plusieurs facteurs. Nous choisirons un liquide qui s'évapore rapidement : *l'éther.*

1. **Influence de la surface libre.** — Deux vases, A large, B étroit, sont remplis d'éther jusqu'aux bords et placés sur les deux plateaux d'une balance sensible (fig. 14 *a*). L'équilibre étant ajusté avec des masses marquées, attendons un moment; la balance s'incline du côté de B. *L'évaporation est donc plus rapide quand la surface libre est plus grande.*

2. **Influence de la température.** — Après avoir réalisé l'équilibre de deux récipients A_1 et B_1 de même surface libre, chauffons légèrement (1) l'un d'eux; la balance s'incline du côté opposé (fig. 14, *b*). *Une élévation de température augmente la vitesse d'évaporation.*

3. **Influence de la pression de vapeur locale du liquide qui s'évapore.** — Équilibrons deux vases de même diamètre, contenant de l'éther qui présente la même surface libre (fig. 14, *c*).

A_2 est plein jusqu'au bord; B_2 contient de l'éther seulement au fond.

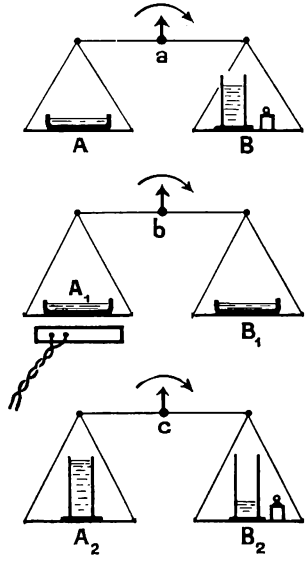


FIG. 14. — *Étude expérimentale de la vitesse d'évaporation.*

(1) Chauffer avec précaution, *sans flamme*, avec un réchaud électrique au-dessous du plateau, car l'éther est inflammable.

Après un certain temps, l'équilibre est rompu au profit de B_2; c'est que la vapeur d'éther formée au-dessus de A_2, se répandant aisément dans l'atmosphère grâce aux légers courants d'air au-dessus de l'éprouvette, est continuellement renouvelée. Au-dessus de B_2 au contraire, la vapeur d'éther séjourne dans l'éprouvette, créant, au niveau de la surface, une pression locale de vapeur d'éther qui retarde la vaporisation.

Loi de DALTON [1]. — *Dalton*, par des expériences quantitatives, établit que la *vitesse d'évaporation est* :

1° *proportionnelle à la surface libre* S *du liquide.*

2° *proportionnelle à la différence* F — *f entre la pression maximum* F *du liquide à la température de ce liquide et la pression locale f de la vapeur déjà répandue dans l'atmosphère au-dessus de la surface libre.*

3° *Inversement proportionnelle à la pression atmosphérique.*

Cette loi se traduit par la relation :

$$V = K.S.\frac{F - f}{H}.$$

V : vitesse d'évaporation. **K** : coefficient dépendant du liquide étudié.

Cette loi est en accord avec les observations précédentes. En particulier, comme F est une fonction rapidement croissante de la température, une élévation de température favorise l'évaporation.

9. APPLICATIONS. — *a*) **Évaporation activée.** — Le linge sèche plus vite quand il est étalé en *grande surface*, par une température *élevée* et au *vent* (qui disperse la vapeur d'eau formée en diminuant ainsi le facteur *f*). Après la pluie, les routes sèchent plus vite par grand vent et s'il fait chaud.

Les *marais salants* ont toujours une très grande surface libre.

La *sueur* s'évapore vite à la chaleur et aux courants d'air.

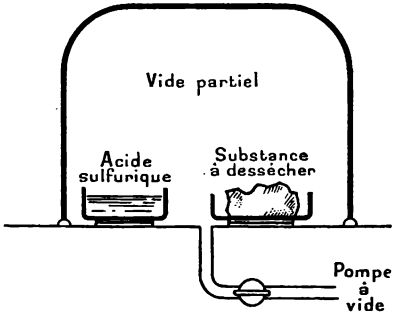


FIG. 15.

On peut réaliser artificiellement une atmosphère illimitée où la pression H est faible en maintenant un vide partiel au-dessus du liquide à évaporer. En Chimie, on active la *dessiccation* d'une substance en la plaçant sous une cloche pneumatique (fig. 15), à côté d'un récipient contenant de l'acide sulfurique. A la faveur du vide partiel, la vapeur d'eau se forme rapidement; elle est absorbée par l'acide sulfurique.

(1) DALTON (V. notice biographique).

b) **Évaporation retardée.** — Pour conserver un liquide volatil (éther, alcool...), il ne faut pas lui laisser une large surface libre; on le place dans un vase à ouverture étroite. On arrête complètement l'évaporation en *bouchant* le récipient (fig. 16). Le liquide s'évapore alors dans une *atmosphère d'air limitée*, et l'évaporation s'arrête quand la pression locale f de la vapeur est égale à la pression maximum F du liquide à la température de la salle. Nous sommes ainsi ramenés au cas étudié au paragraphe 7.

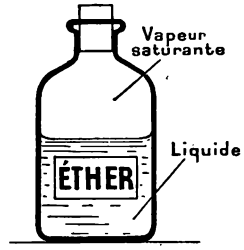


FIG. 16

E. ÉBULLITION

10. OBSERVATION DU PHÉNOMÈNE : PREMIÈRE LOI DE L'ÉBULLITION. — Observons de l'eau *pure* chauffée régulièrement dans un ballon. Nous noterons invariablement les faits suivants :

1° A partir d'une certaine température, de très fines bulles gazeuses se détachent des parois et viennent crever la surface (fig. 17) Elles contiennent de l'air, du gaz carbonique etc. ***L'eau abandonne les gaz dissous.***

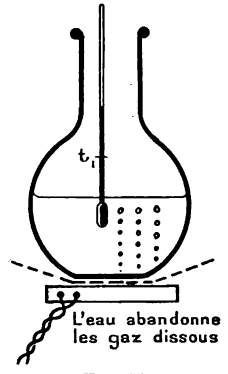


FIG. 17

2° La température continuant de s'élever, des bulles prennent naissance en certains points de la paroi, grossissent, se détachent, montent dans le liquide en diminuant de volume et ne parviennent pas jusqu'à la surface (fig. 18). Ce sont des bulles de vapeur qui, dans leur ascension, rencontrent des couches de plus en plus froides où elles finissent par se condenser en eau liquide. A ce moment on entend un bruit particulier : ***l'eau « chante ».***

3° Bientôt la température est assez élevée dans tout le liquide. Des bulles se forment toujours aux mêmes points de la paroi, grossissent, se détachent, traversent le liquide en augmentant de volume, crèvent la surface en brassant

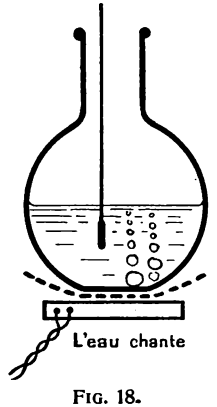


FIG. 18.

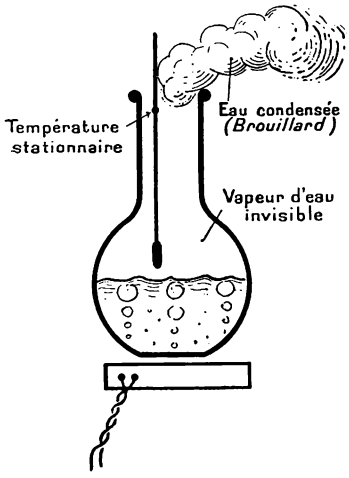


FIG. 19.

l'eau tumultueusement (fig. 19) : ***l'eau bout.***

Pendant toute la durée de l'ébullition, un thermomètre dont le réservoir est placé au voisinage immédiat de la surface du liquide indique une température fixe; d'où la loi :

Première loi de l'ébullition : *Sous une pression déterminée, l'ébullition d'un corps pur commence toujours à la même température. Cette température reste constante pendant toute la durée du phénomène.*

11. L'ÉBULLITION EST UN CAS PARTICULIER DE LA VAPORISATION : DEUXIÈME LOI DE L'ÉBULLITION.

Expérience. — Dans un ballon dans lequel nous chauffons de l'eau, introduisons un tube T *recourbé en forme de crosse* (fig. 20, *a*). Dans la branche fermée, nous avons introduit un faible volume d'eau *bien privée d'air* par une ébullition prolongée. Un *piston de mercure* sépare cette eau de l'extérieur et le mercure s'élève inégalement dans les deux branches (niveaux *m* et *n*).

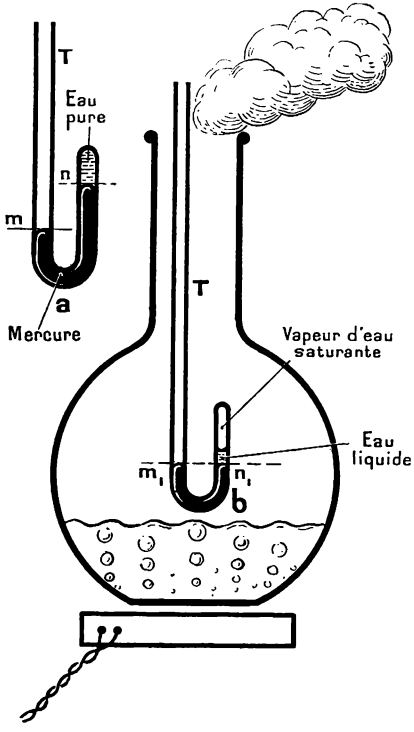


FIG. 20. — *Loi de l'ébullition.*

Dès que l'eau entre en ébullition, les deux niveaux du mercure s'égalisent (m_1 et n_1) pendant qu'on assiste à une *vaporisation partielle* de l'eau dans la branche fermée du tube T (fig. 20, *b*).

La pression maximum de l'eau est donc, à la température intérieure du ballon (température d'ébullition de l'eau qu'il contient), égale à la pression atmosphérique; d'où la loi :

Deuxième loi de l'ébullition : *La température d'ébullition d'un corps pur est la température pour laquelle sa pression maximum de vapeur est égale à la pression que supporte le liquide.*

Nous serions arrivés à cette conclusion en examinant la courbe de vaporisation d'un liquide quelconque. Pour l'eau, par exemple, partons du liquide à la pression atmosphérique et à la température 20° (fig. 21). Cet état initial est figuré par le point A. Élevons la température sous pression constante. Le point figuratif décrit la droite ABCD... En E, nous atteignons la température 100°, l'eau bout et la pression maximum de sa vapeur est précisément égale à la pression atmosphérique.

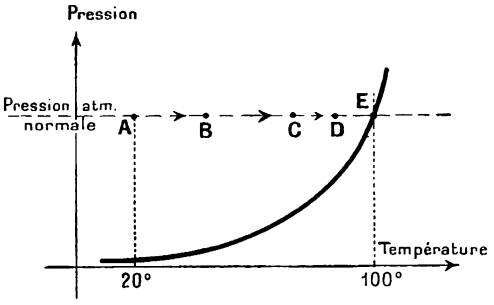


FIG. 21.

On voit par là que l'ébullition n'est qu'un aspect particulier du phénomène général de la vaporisation.

12. CONSÉQUENCES.

1° Température d'ébullition normale. Comme la courbe de la figure 21 l'indique la température d'ébullition dépend largement de la pression et l'influence de la pression est ici beaucoup plus importante que sur la température de fusion (Leçon 24, § 6). On appelle ***température d'ébullition normale,*** celle qui correspond à la pression atmosphérique normale. Voici quelques-unes de ces températures :

TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION NORMALE (en degrés Celsius)

Hélium	— 267°	Éther	+ 35°
Hydrogène	— 253°	Alcool	+ 79°
Azote	— 195°	Eau (par définition)	+ **100°**
Oxygène	— 183°	Mercure	+ 357°
Anhydride sulfureux	— 8°	Zinc *environ*	+ 900°

La température d'ébullition normale compte, comme le point de fusion, au nombre des caractères qui permettent d'*identifier* un corps *pur*. C'est un de ses *critères de pureté.*

2° Point thermométrique 100 °C. — On comprend maintenant pourquoi, dans la Leçon 19, § 7, nous avons insisté sur la nécessité de connaître la pression dans l'enceinte où plonge un thermomètre qu'on désire graduer. Au voisinage du point 100° (point E de la fig. 21), une variation de pression de 27 mm de mercure entraîne une variation de 1° de

la température d'ébullition. Dans la graduation d'un thermomètre, on doit tenir compte :

a) de la pression barométrique du moment;

b) de l'excès de pression dans l'enceinte sur la pression atmosphérique extérieure. Cette correction, inutile pour le point zéro, est ici indispensable.

3° Applications pratiques des lois de l'ébullition : 1. **Autoclaves.** — Un autoclave est un récipient métallique, résistant, hermétiquement clos, dans lequel on chauffe de l'eau en présence de l'air qui se trouvait dans l'appareil au moment de la fermeture du couvercle (fig. 22).

Quand on chauffe tout l'appareil à température uniforme, de l'eau se vaporise et la pression gazeuse *totale* est à chaque instant :

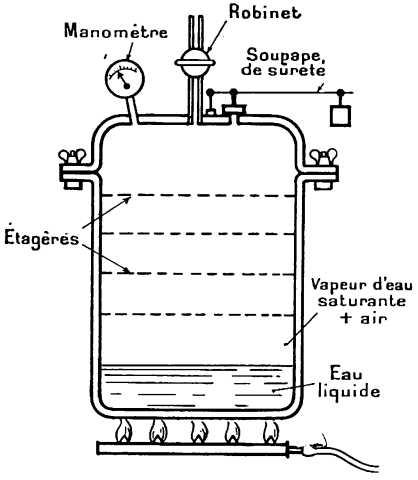


FIG. 22. — *Autoclave.*

$$\underset{\text{supportée par l'eau liquide}}{P} = \underset{\text{air initial}}{p} + \underset{\text{pression maximum de la vapeur d'eau}}{P'}.$$

A cause de la pression p de l'air initial, qui ne peut s'annuler, la pression supportée par l'eau liquide est toujours supérieure à la pression P'. Jamais P' n'atteint P et l'*ébullition est impossible.* La température peut s'élever à 110 °C, 120 °C... sans que l'eau se mette à bouillir. Cette température permet de stériliser des instruments de chirurgie, des conserves, ou de cuire rapidement des aliments (marmite à pression). Une *soupape de sûreté*, souvent réglable, sert à limiter la pression obtenue. Un *manomètre* indique cette pression. En se reportant à la courbe de vaporisation de l'eau, on peut donc connaître la température qui règne dans l'autoclave.

2. **Ébullition sous pression réduite.** — Sous une pression réduite l'ébullition d'un liquide s'effectue à une température inférieure à la température d'ébullition normale.

a) Au sommet du Mont Blanc (altitude : 4 807 m; pression barométrique : 45 cm de mercure), l'eau pure bout à 85 °C.

b) On utilise cette propriété pour vaporiser des liquides qui, chauffés à leur température d'ébullition normale, *se décomposent* (glycérine, etc.). En les plaçant dans une atmosphère d'air raréfié (fig. 23), il suffit de les chauffer modérément.

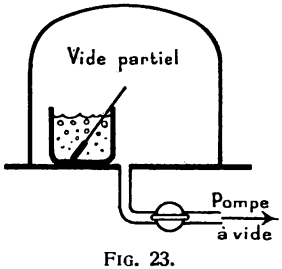


FIG. 23.
Ébullition sous pression réduite.

c) Signalons l'expérience connue sous le nom de **bouillant de Franklin.** De l'eau est maintenue un moment à l'ébullition de façon à chasser, par la vapeur formée, la plus grande partie de l'air du ballon qui la contient (fig. 24). Bouchons le ballon; retournons-le, le col en bas, l'orifice dans l'eau d'une cuve, pour empêcher toute rentrée d'air, et attendons que la température de l'eau intérieure s'abaisse nettement. Refroidissons alors énergiquement le dôme du ballon. Résultat paradoxal : l'eau se met à bouillir violemment! (fig. 24, *b*). En refroidissant nous avons provoqué la *condensation partielle* de la vapeur d'eau sur le verre, et créé ainsi une baisse de la pression en **c.** L'eau peut alors bouillir à une température très inférieure à 100 °C.

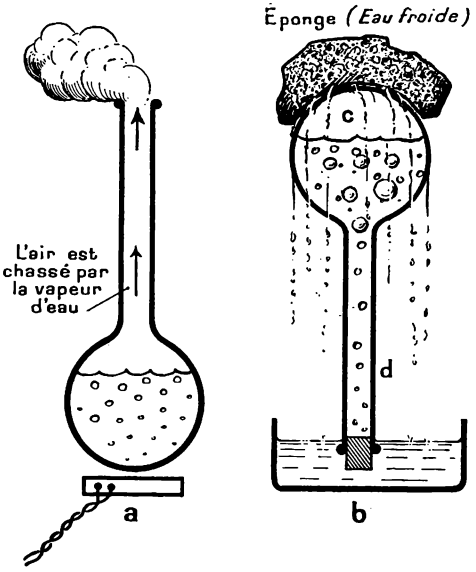


FIG. 24. — *Bouillant de Franklin.*

3. **Distillation.** — *Principe de la paroi froide* : deux récipients A et B contenant le même liquide, peuvent communiquer par une tubulure. Maintenons-les à des températures différentes : $t_A > t_B$ (fig. 25). Le robinet étant fermé, les liquides sont surmontés de leurs vapeurs saturantes, dont les pressions maxima sont F_A et F_B ($F_A > F$).

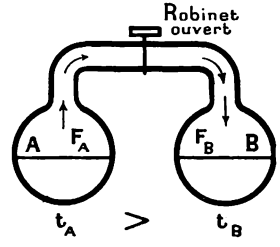


FIG. 25.

Ouvrons le robinet. La vapeur de A passe en B où elle trouve une température *inférieure à la température à laquelle (d'après la courbe de vaporisation) elle doit passer à l'état liquide.* Elle se condense donc en B, et le phénomène se poursuit jusqu'à épuisement du liquide de A.

Ainsi dans un récipient *clos* dont toutes les parties ne sont pas à la même température, un corps ne peut se maintenir à l'état liquide que dans la partie la plus froide. ***La pression maximum de la vapeur saturante est celle qui correspond à la température de paroi la plus froide.***

La **distillation** consiste à *vaporiser* un liquide (généralement par ébullition) dans un vase A et à *condenser* la vapeur dans un autre vase plus froid B.

a) Quand le liquide contient en dissolution des *solides*, l'expérience montre que ces substances restent dans le premier vase, le liquide pur étant recueilli dans le second.

Au laboratoire, l'ébullition est en général produite dans un ballon, les vapeurs refroidies en traversant le tube central d'un manchon réfrigérant, se condensent (fig. 26 et 1). L'*alambic* est un appareil à distiller à grande échelle (voir *Cours de Chimie*).

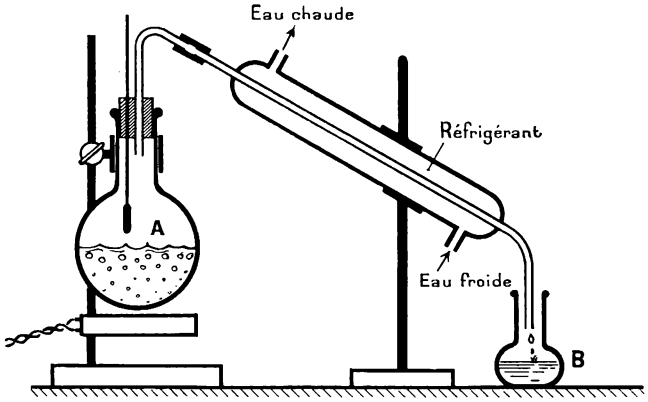


FIG. 26. — *Distillation simple.*

b) Quand le liquide contient en dissolution un autre *liquide*, on a recours à une opération dite : *distillation fractionnée*, qui sera étudiée plus tard.

F. CHALEUR DE VAPORISATION

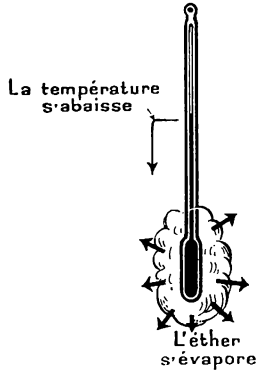


FIG. 27. — *L'évaporation produit du froid.*

13. EXISTENCE D'UNE CHALEUR DE VAPORISATION. — Pendant toute la durée de l'ébullition, la température du liquide reste fixe, et cependant nous ne cessons de lui *fournir de la chaleur.* D'autre part, une évaporation rapide produit du froid : en versant une goutte d'éther sur la main nous le sentons nettement; le phénomène est encore mieux visible si on imbibe d'éther un tampon d'ouate qui entoure le réservoir d'un thermomètre; en agitant l'appareil pour activer la vaporisation on voit le niveau du mercure s'abaisser de plusieurs degrés (fig. 27).

Définition : *On appelle* chaleur de *vaporisation* [1] ***d'un corps pur la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse de ce corps pour le faire passer de l'état liquide à l'état de* vapeur saturante *à température constante.***

Exemple. — 1 g d'eau demande 539 cal pour passer de l'état liquide à 100 °C à l'état de vapeur d'eau saturante à 100 °C. Inversement, la liquéfaction de 1 g de vapeur d'eau saturante à 100 °C en 1 g d'eau liquide à 100 °C restitue 539 cal.

(1) On dit aussi : chaleur *latente* de vaporisation.

Mesure. — On mesure en général, par la méthode des mélanges, la chaleur fournie par la *condensation* d'une masse connue du corps étudié.

Mais la vaporisation et la condensation peuvent se produire à toute température (différence essentielle avec la fusion et la solidification), et on constate que la chaleur de vaporisation *dépend de la température* à laquelle le phénomène se produit. Les résultats doivent donc mentionner les conditions expérimentales.

Résultats. — Voici quelques chaleurs de vaporisation correspondant aux températures d'ébullition *normales*.

CORPS PURS	CHALEURS DE VAPORISATION	TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION NORMALE
	calories/gramme	
Eau	539	+ 100 °C
Ammoniac	341	— 33 °C
Alcool	216	+ 79° C
Anhydride sulfureux	95	— 8 °C
Benzène	94	+ 80 °C
Ether	90	+ 35 °C

Le cas de l'**eau** est particulièrement important au point de vue pratique :

a) L'eau possède une chaleur de vaporisation *notablement plus élevée que celle de la plupart des liquides*. L'évaporation de l'eau de pluie contribue à tempérer les fortes chaleurs en été; par évaporation de l'eau retenue dans un linge humide qui entoure une carafe on maintient frais le liquide à l'intérieur; les *alcarazas*, vases en terre poreuse, laissent lentement évaporer l'eau qu'ils contiennent, surtout quand on les place dans un courant d'air; l'eau qui reste à l'intérieur est ainsi constamment refroidie.

La chaleur de vaporisation de l'eau peut être calculée par la formule :

$$L = 606{,}5 - 0{,}695 \, t$$

où **t** est la température centésimale de la vaporisation. Pour $t = 100$ °C, on retrouve :

$$L = 606{,}5 - 69{,}5 = 537 \text{ cal (au lieu de 539).}$$

L'accord de la formule avec l'expérience est satisfaisant entre 0° C et 200 °C.

G. NOTIONS SUR LA LIQUÉFACTION DES GAZ

La liquéfaction d'un gaz est le phénomène inverse de la vaporisation.

14. *EXISTENCE D'UNE TEMPÉRATURE CRITIQUE : CONDITIONS DE LIQUÉFACTION.* — Puisqu'il est possible d'effectuer la vaporisation d'un liquide à toute température, si on abaisse suffisamment la pression qu'il supporte, il semble qu'on puisse inversement liquéfier un gaz à toute température en augmentant suffisamment sa pression. ***L'expérience ne vérifie pas cette hypothèse.*** *Il existe pour chaque gaz une température au-dessus de laquelle il est impossible de le liquéfier par simple compression.* Cette température est appelée **température critique** (t_c). Exemples : Eau : $t_c = +\ 374$ °C; gaz carbonique : $t_c = +\ 31$ °,4 C.

Pour liquéfier un gaz on devra donc :

1° L'amener à une température ***t*** *inférieure à la température critique* $\boldsymbol{t_c}$.

2° Le *comprimer* jusqu'à obtenir une pression égale à sa pression maximum de vapeur saturante à la température ***t***.

En pratique, on opère par compressions et refroidissements simultanés ou successifs.

USAGES DES GAZ LIQUÉFIÉS. — La liquéfaction des gaz permet d'en transporter une masse importante sous un faible volume. Citons quelques gaz dont la liquéfaction a gagné aujourd'hui le domaine industriel :

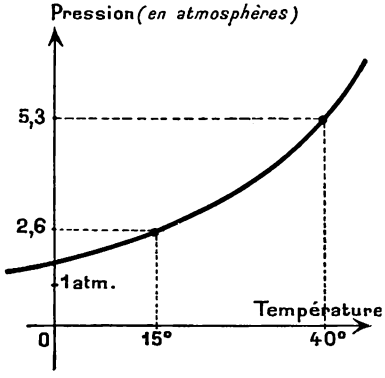


FIG. 28. — *Courbe de vaporisation du gaz butane commercial.*

l'air, l'oxygène, l'azote (voir *Cours de Chimie*),

le gaz carbonique,

l'ammoniac, l'anhydride sulfureux; leur évaporation rapide produit un froid intense utilisé pour congeler de l'eau dans certaines machines frigorifiques.

le chlorure de méthyle, le chlorure d'éthyle. (étudiés plus tard au point de vue chimique). Ces corps sont utilisés comme agents de réfrigération locale (anesthésiques).

le propane, le butane, dont l'emploi est courant comme combustibles.

La courbe de vaporisation du gaz butane commercial (1) (fig. 28) montre qu'à la température ordinaire (de 10 °C à 20° C), la pression maximum de vapeur varie entre 2 et 3 atm. A + 40 °C, température pratiquement jamais atteinte dans les conditions ordinaires d'emploi, elle est de 5,3 atm.

Il est donc possible de stocker et de transporter le butane *liquide, surmonté de sa vapeur saturante*, dans des récipients en tôle d'acier de *résistance moyenne*, donc de poids relativement faible (fig. 29). Un robinet détendeur permet au gaz de s'échapper pour être brûlé pendant que la pression diminue au-dessus du liquide. Celui-ci se vaporise alors jusqu'à ce qu'elle ait repris sa valeur initiale, égale à la pression maximum de vapeur du butane liquide à la température de la pièce où il se trouve.

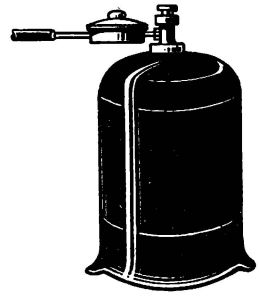


FIG. 29. — *Usage des gaz liquéfiés : le butane.*

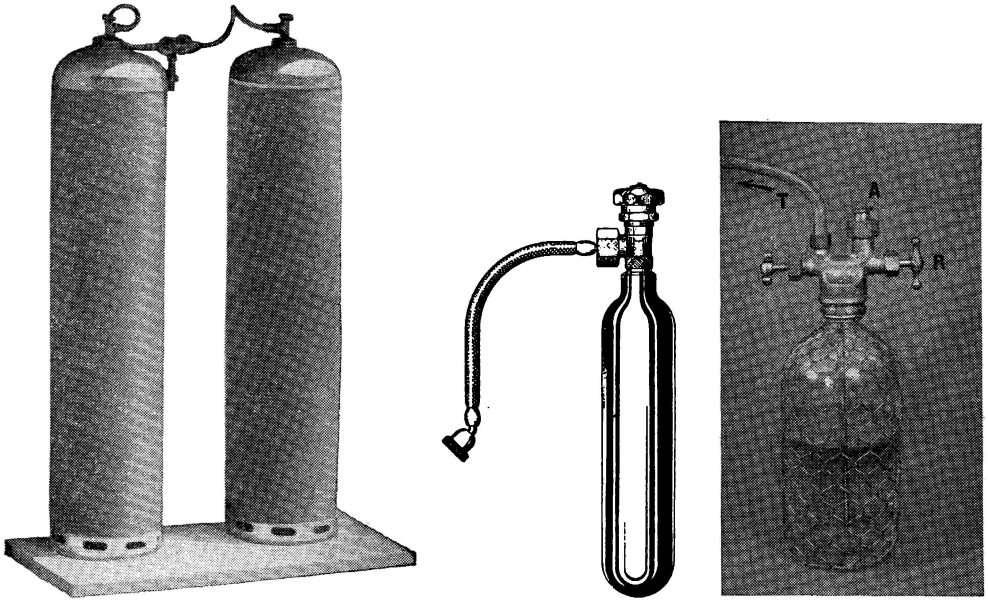


FIG. 30. — ***Bouteilles de gaz liquéfiés.***

A gauche : *Réservoirs à propane; hauteur* : 1 *mètre.*

Au centre : *Bouteille contenant de l'anhydride carbonique liquide; hauteur* 30 *cm.*

A droite : *Siphon à anhydride sulfureux.* ***A*** *et* ***R*** *: remplissage.* ***T*** *: tube par lequel peut s'échapper (position de la figure) le liquide sulfureux, chassé par la pression de sa vapeur saturante; hauteur* : 30 *cm.*

(1) Le butane commercial est un **mélange** (butane, isobutane). Il suit les lois des mélanges de gaz.

EXERCICES

1. Dans la chambre barométrique d'un tube de Torricelli cylindrique, on introduit un liquide qui se vaporise entièrement. Le niveau du mercure qui était initialement à 75 cm au-dessus du mercure de la cuvette se fixe maintenant à 25 cm au-dessus de ce niveau.

On enfonce le tube de 10 cm et le niveau mercuriel s'abaisse encore de 4 cm.

Quelle était la hauteur initiale de la chambre barométrique? Rép. : 31 cm.

2. Un tube barométrique, de section intérieure 1 cm^2 contient du mercure sur une hauteur de 74 cm au-dessus du mercure de la cuvette. La chambre barométrique a 15 cm de longueur. On y introduit une goutte d'éther qui se vaporise entièrement pendant que le niveau du mercure s'abaisse à 60 cm. La température est 13,6 °C. Quel est la masse de la goutte d'éther?

Formule de l'éther : $(C_2H_5)_2$ O; un litre d'air normal pèse 1,3 gf. Rép. : 16,8 mg.

3. A la température de + 20 °C, on introduit dans une chambre barométrique cylindrique de longueur 20 cm une certaine masse d'alcool dont les 2/3 sont vaporisés. De quelle hauteur peut-on soulever le tube barométrique sans que le niveau du mercure varie?

Pression maximum de l'alcool à + 20 °C : 4,4 cm de mercure. Rép. : 12,2 cm.

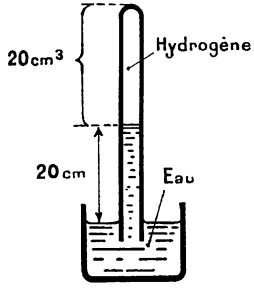


FIG. 31.

4. Quelle masse d'hydrogène renferme l'éprouvette de la figure 31?

Pression atmosphérique : 74 cm de mercure.
Température : 30 °C.
Pression maximum de la vapeur d'eau à 30 °C : 3,2 cm de mercure. Rép. : $\simeq$ 0,0014 g.

5. A quelle température bout l'eau au sommet de la Tour Eiffel (hauteur 300 m)? On précise qu'une variation de 27 mm de mercure de la pression atmosphérique entraîne, au voisinage de 100 °C, une variation de 1° de la température d'ébullition de l'eau. Température d'ébullition au pied de la tour 100 °C.

Un litre d'air normal pèse 1,3 gf.
Rép. : $t \simeq 99$ °C.

6. Quelle erreur commet-on dans la détermination du point Cent d'un thermomètre quand on néglige de tenir compte de l'excès de pression indiqué par le manomètre (Leçon 19. fig. 9 : Excès de pression mesuré par 13,6 cm d'eau).
Rép. : 0,37 °C.

7. Un appareil à distiller fournit 2 l d'eau à l'heure. Le réfrigérant reçoit de l'eau à 10 °C et l'évacue à 40 °C. Quelle doit être la consommation d'eau froide en une heure pour alimenter le réfrigérant, sachant que l'eau distillée se condense à 100 °C et est ensuite recueillie à 15 °C. On néglige toutes les pertes de chaleur. Rép. : 41,4 l.

8. De la vapeur d'alcool vient se condenser, à 80 °C, dans un serpentin plongé dans un calorimètre dont la valeur en eau totale (vase, eau, serpentin, accessoires) est 400 $\pm$ 2 g. On recueille 2,30 g d'alcool pesés à 1 cg près. L'eau du calorimètre est passée de 14,62 °C à 16,02 °C. Sachant que chacune de ces deux dernières températures est repérée à 0°,01, déterminer la chaleur de vaporisation L de l'alcool dans les conditions de l'expérience. On indiquera dans le résultat la précision de la mesure.

Chaleur massique de l'alcool : 0,5 cal.
Rép. : $L = 2_{11}$ cal. $\pm$ 6 cal.

PROBLÈMES

1. Un tube barométrique de 1 cm² de section est renversé sur la cuve à mercure. La pression atmosphérique est de 76 cm de mercure et le volume de la chambre barométrique 24 cm³.

On introduit dans le tube 0,05 g d'un liquide volatil de tension de vapeur 19 cm de mercure.

Décrire les phénomènes observés en soulevant le tube à partir de sa position initiale.

La masse volumique de la vapeur saturante est de 0,0009 g. (*Bacc.*, Dijon, 1945.)

2. Un récipient cylindrique à parois indéformables, dont la section intérieure est un cercle de surface 50 cm², contient une couche d'eau d'épaisseur 1 mm, à la température de 0 °C, surmontée d'un piston P pesant 20 kgf. On élève la température à 110 °C : l'eau se transforme en vapeur et le piston est soulevé.

1° Quelle est la pression maximum de la vapeur d'eau saturante à 110 °C?

2° A un certain moment, la dernière trace de liquide disparaît. De quelle hauteur le piston a-t-il été soulevé?

3° Quel est le travail effectué par la vapeur? L'exprimer en kilogrammètres et en joules.

Pression atmosphérique : 76 cm de mercure.

Densité du mercure : 13,6.

Masse du litre d'air à 0° sous la pression de 76 cm de mercure : 1,3 g.

Densité de la vapeur d'eau : 0,625.

Coefficient de dilatation des gaz : $\alpha = \frac{1}{273}$.

On considérera que la vapeur d'eau se comporte comme un gaz parfait; on supposera qu'il n'existe aucune fuite et l'on négligera les frottements. (*Bacc.*, Rennes, 1945.)

3. Un tube barométrique cylindrique, de section intérieure 4 cm² est disposé verticalement sur une cuve à mercure profonde à niveau constant. Longueur totale émergente du tube : 1 mètre; longueur de la colonne de mercure dans le tube : 75 cm. Pendant toute la durée des expériences : température : + 12 °C; pression atmosphérique 75 cmHg.

1° On introduit dans le tube une goutte d'éther. La vaporisation se produit instantanément dans la chambre barométrique et fait baisser le mercure de 5 cm. Si, alors, on soulève ou si on enfonce le tube, le niveau intérieur du mercure ne reste pas fixe. Quelle masse d'éther a-t-on introduit?

2° Partant de la position initiale (hauteur totale 1 m) on enfonce lentement le tube dans la cuve. Décrire ce qui se passe dans la chambre barométrique jusqu'au moment où tout l'éther est à l'état liquide.

3° Construire le graphique représentant en abscisses les volumes occupés par l'éther et en ordonnées les pressions dans la chambre. Échelles : Pression : 1 cm représente 5 cmHg; volumes : 1 cm représente 5 cm³. Indiquer l'allure de la courbe quand, la liquéfaction étant terminée, on enfonce le tube encore plus profondément.

Formule de l'éther : $(C_2H_5)_2O$.

Densité de l'éther liquide : 0,7.

Pression maximum de vapeur de l'éther, à + 12 °C : 30 cmHg.

Masse volumique de l'air (conditions normales) : 1,3 g/cm³.

4. 1° On introduit une trace d'éther dans la chambre d'un tube barométrique retourné sur une cuve profonde contenant du mercure; le mercure monte dans le tube jusqu'à une hauteur de 65 cm. Sachant que la pression atmosphérique est de 76 cm de mercure, quelle est la pression de la vapeur d'éther dans la chambre barométrique?

2° On enfonce le tube dans la cuve, la vapeur restant non saturante; la hauteur du mercure dans le tube devient 50 cm. Quelle est la diminution relative du volume de la chambre barométrique?

3° On continue à enfoncer le tube jusqu'à ce qu'il apparaisse une goutte de liquide à la surface du mercure. Sachant que la pression maximum de la vapeur d'éther à la température de l'expérience est de 37 cm de mercure, quelle est alors la hauteur du mercure dans le tube? Qu'observe-t-on si l'on continue à enfoncer le tube dans la cuve?

4° On porte le tube à la température d'ébullition de l'éther sous la pression atmosphérique (34°6 C) et l'on s'arrange pour que la vapeur d'éther dans le tube demeure constamment saturante. Qu'observe-t-on?

5° On fait arriver, durant un certain temps, de la vapeur saturante d'éther sous la pression de 76 cm de mercure (sa température est donc 34°6 C) dans un serpentin plongé dans un calorimètre. La valeur en eau du calorimètre est de 554 g et sa température initiale de 15 °C. On admettra que toute la vapeur d'éther se condense dans le serpentin. La température finale du calorimètre est de 18°6 C : la masse d'éther condensée dans le serpentin est 20 g. Calculer la chaleur latente de vaporisation de l'éther sous la pression de 76 cm de mercure. On donne : chaleur massique de l'éther liquide : 0,51 cal/g.

(*Bacc.* Nancy, 1945).

PROBLÈMES

FORCES. ÉQUILIBRES. MACHINES SIMPLES.

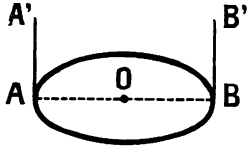
1. Dans le prolongement du diamètre AA′ d'une roue de bicyclette mobile autour d'un axe horizontal et ayant comme rayon 30 cm, on fixe une tige AB de longueur 40 cm et pesant 2 kgf.

1° Quelles positions d'équilibre peut prendre ce système? Nature des équilibres?

2° En A′ on applique, dans le plan de la roue, une force F de façon à maintenir la tige AB horizontale. Calculer l'intensité de cette force dans les deux cas suivants : *a*) F est verticale; *b*) F fait un angle de 45° avec la verticale.

3° Sachant que la roue de bicyclette pèse 2,5 kgf, définir dans les deux cas les réactions de l'axe et trouver leur intensité soit par le calcul, soit graphiquement.

2. Un cerceau métallique homogène de centre O et de rayon R = 10 cm pèse 300 gf. En deux points diamétralement opposés A et B sont soudées deux tiges métalliques homogènes AA′ et BB′ perpendiculaires au plan du cerceau et placées du même côté de ce plan (fig.). Chaque tige pèse 150 gf. et a une longueur égale à 10 cm. L'ensemble est indéformable.



1° Trouver la position du centre de gravité du solide; on calculera la distance OG = *d*.

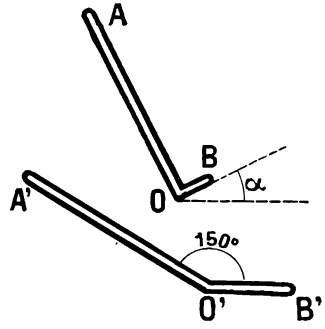
2° L'appareil étant suspendu par A′ et B′ et pouvant tourner autour de l'axe fixe A′B′ quelle position prend-il? Quelle est la réaction de chacun des supports?

3° En le faisant tourner autour de A′B′ on amène le solide dans une position pour laquelle le plan du cerceau est vertical. Déterminer l'intensité de la force verticale, appliquée au point le plus haut du cerceau qui permet cet équilibre.

4° Le solide repose sur un plan horizontal par les points A′, B′ et un point du cerceau. Déterminer, en supposant tous les frottements négligés, les forces supportées par les points d'appuis.

3. 1° Un levier coudé AOB est formé de deux branches perpendiculaires : AO = 80 cm et BO = 10 cm. Il est mobile autour d'un axe perpendiculaire en O au plan de la figure.

La branche OB étant d'abord horizontale et le point A au-dessus de O, on applique en B un poids de 10 kgf et on agit à l'extrémité A avec une force F assujettie à rester constamment perpendiculaire à OA.



Calculer la valeur de F quand l'équilibre est réalisé et que OB fait avec l'horizontale les angles suivants : $\alpha = 0°, 30°, 45°, 60°, 90°$.

2° Représenter les résultats par une courbe en portant en abscisses les angles α (en degrés) et en ordonnées les forces F (en kgf).

3° Un autre levier coudé A′O′B′ est formé de deux branches faisant un angle de 150°.

Il est également mobile autour d'un axe perpendiculaire en O′ au plan de figure. La branche O′B′ est horizontale et O′A′ = 2 O′B′.

On applique en A′ et B′ deux poids P_1 et P_2. Quel doit être leur rapport pour que le levier soit en équilibre?

N. B. — Dans tout le problème, négliger les poids des leviers.

4. On veut installer un train à crémaillère sur une pente dont la longueur est 5 km. La distance verticale des points extrêmes est de 1 500 m. Chaque wagon, voyageurs compris, pèse 5 000 kgf. On demande :

1° La force que le moteur devra déployer pour entraîner un wagon le long de la pente. Démonstration.

2° Le travail nécessaire pour l'ascension d'un seul wagon. Montrer que si le wagon avait été soulevé par un câble vertical de téléférique, le travail eût été le même.

3° Le train monte la pente à une vitesse moyenne de 12 km à l'heure. Quelle est, en chevaux-vapeur, la puissance du moteur susceptible de faire monter deux wagons semblables?

4° Le travail utilisé étant celui d'une chute d'eau de 10 m de hauteur, les pertes étant évaluées à 25 %, quelle est la quantité d'eau qui doit être captée par heure pour faire marcher le moteur qui entraîne les deux wagons?

5. Un funiculaire relie deux stations dont l'une est à une altitude de 800 m au-dessus de l'autre. La voie a 2 km de longueur. La voiture pèse 5 000 kgf et sa vitesse est 12 km à l'heure. Calculer :

1° le travail effectué pour une ascension;

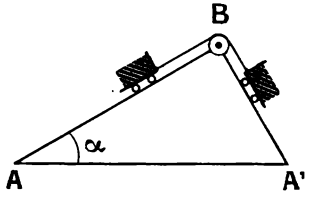
2° la puissance, en chevaux-vapeur et en kilowatts, du moteur qui effectue ce travail;

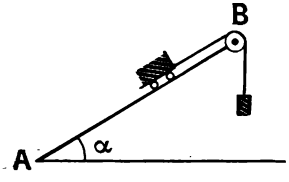
3° la quantité d'eau qu'il faut capter, par heure, à une chute de 15 m de hauteur pour mettre en marche ce moteur au moyen d'une turbine et d'une installation électrique dont le rendement est 72 %.

6. Un rail AB fait un angle α avec le plan horizontal. AB = 2 m. Un petit chariot descend le long de ce rail. Son poids est de 250 gf.

1° Calculer en kilogrammètres le travail effectué par la pesanteur dans le trajet BA dans les cas suivants :

a) $\alpha = 0°$; *b*) $\alpha = 90°$; *c*) $\alpha = 30°$.





2° Calculer en chevaux-vapeurs et en watts la puissance moyenne fournie par la pesanteur dans le cas *b*), le trajet ayant duré 0,64 s.

3° En B, on installe une poulie sur laquelle passe sans frottement un fil; d'un côté, ce fil est attaché au chariot et il est parallèle au rail. Quel poids faut-il appliquer de l'autre côté pour que le système reste en équilibre dans les cas *b*) et *c*) envisagés précédemment? Que pensez-vous du cas *a*)?

4° On laisse en B la poulie et le fil et on accroche au rail AB un rail BA'; A et A' sont dans le même plan horizontal; $\alpha = 30°$; les deux rails sont dans un même plan vertical et perpendiculaires l'un à l'autre.

Du côté de BA, le fil est attaché au chariot précédent; du côté de BA', il est attaché à un autre chariot. Les deux brins de fil sont parallèles aux rails. Quel doit être le poids total du deuxième chariot pour que le système reste en équilibre?

7. La manivelle d'un treuil a 60 cm de rayon; le cylindre sur lequel s'enroule la corde a un rayon de 15 cm.

Le treuil est utilisé pour tirer l'eau d'un puits dont la profondeur est de 10 m; le seau employé contient 10 litres d'eau.

1° Quel est en kilogrammes-force l'effort exercé sur la manivelle quand on tire un seau d'eau?

2° Quel est le travail effectué pour tirer un hectolitre d'eau? L'exprimer en kilogrammètres et en joules.

3° Quel est l'espace parcouru par l'extrémité de la manivelle et combien faut-il faire de tours pour tirer un seau d'eau?

4° Quelle puissance moyenne faut-il mettre en jeu pour tirer 10 hectolitres d'eau à l'heure? Exprimer cette puissance en kilogrammètres/seconde, en chevaux-vapeur et en watts.

(*Bacc.* Montpellier, 1945.)

8. Un chariot pesant 900 kgf gravit un plan incliné de pente 2,5 %.

1° Calculer la force nécessaire pour mouvoir le chariot sur cette pente, en supposant les frottements négligeables.

2° On dispose d'un treuil dont le tambour a 30 cm de diamètre et dont la manivelle a

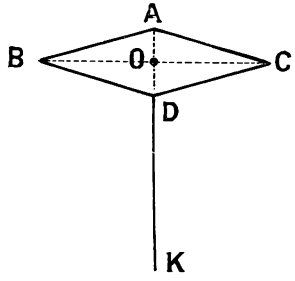
50 cm de rayon. Le chariot étant attelé à la corde du treuil, quelle force faut-il exercer sur la manivelle pour mettre le chariot en mouvement?

3° Quel a été le travail du manœuvre lorsque le chariot a avancé de 38 m?

4° Sachant que le manœuvre développe une puissance de 0,08 CV, quelle est la vitesse du chariot?

(*Bacc. Strasbourg.*)

9. Un fléau de balance est constitué par une plaque métallique homogène d'épaisseur constante, en forme de losange dont les diagonales sont (fig.) : AD = 10 cm; BC = 40 cm. Le couteau central a son arête en O, point de concours des diagonales. Les deux couteaux latéraux sont B et C. L'aiguille DK est une tige métallique cylindrique, homogène, de longueur 32 cm. Le poids du fléau est P = 200 gf; celui de l'aiguille est p = 10 gf.



I

1° Quelle est la portée du centre de gravité G de l'ensemble fléau-aiguille? On calculera sa distance d au point O.

2° Quelle masse M devrait-on placer en A pour que le système soit en équilibre indifférent autour de l'axe O?

3° Dans ce cas quelle serait la réaction R de cet axe?

II

1° La diagonale BC étant horizontale et le fléau (poids total aiguille comprise 210 gf) étant en équilibre stable, on dépose sur B une surcharge p_1 et on constate que l'aiguille s'immobilise après avoir tourné de 45° autour de O. Déterminer p_1.

2° Quelle est alors la nouvelle réaction R' de l'axe O?

III

Le fléau (210 gf) étant horizontal, plusieurs équilibres successifs sont réalisés en plaçant à chaque fois 100 g dans chacun des plateaux. On estime que l'extrémité K revient, à chaque arrêt, dans la même position. L'observateur peut apprécier un déplacement de K de $\frac{1}{4}$ mm.

1° La balance est-elle fidèle?

2° Quelle est sa limite de sensibilité? (On fera pour ce calcul les approximations jugées légitimes).

STATIQUE DES FLUIDES

10. Un cube de glace de 5 cm d'arête pesant 115 gf flotte sur de l'eau à 0° dont la masse volumique est de 1 g par cm³.

1° Quelle est la hauteur d'arête immergée? Quelle masse faudrait-il poser sur la face supérieure du cube pour l'immerger totalement dans l'eau? L'équilibre serait-il stable?

2° L'arête s'enfonce de 4,8 cm si on place le cube dans un liquide L. Quelle est la densité de ce liquide? Quelle est la précision de la mesure sachant qu'on peut faire une erreur de lecture en plus ou en moins de 1 mm? Sous quelle forme donnera-t-on le résultat?

3° Dans un autre liquide L' la face supérieure du cube affleure juste le niveau du liquide. Calculer la densité de L' et indiquer pourquoi ce résultat était attendu.

11. Un tube à essai, parfaitement cylindrique, de diamètre D = 2 cm et de longueur L = 20 cm, est lesté par une goutte de mercure et fermé par un bouchon à sa partie supérieure. Son poids total est de 30 gf.

1° Placé dans un liquide de densité d = 1,5, il prend une position d'équilibre verticale. Quelle est la longueur L_1 immergée?

2° Le tube étant dans la position précédente, on place sur le bouchon une masse supplémentaire de 10 g. Quelle est la longueur L_2 immergée?

3° Sans enlever la masse de 10 g, on verse sur le liquide une couche d'eau de 4 cm d'épaisseur. L'eau et le liquide ne se mélangent pas. Quelle est la longueur L_3 immergée dans le liquide de densité 1,5?

4° On enlève alors la masse de 10 g placée sur le bouchon. Quelle est la longueur L_4 immergée dans le liquide?

(*D'après Bacc. Clermont.*)

12. Un corps solide cylindrique est formé d'une partie métallique de densité 7 et de hauteur 1 cm et d'une partie en bois de densité 0,7 et de hauteur 29 cm.

1° Calculer la distance du centre de gravité au centre de poussée.

2° De quelle hauteur le corps s'enfonce-t-il dans l'eau?

3° Quelle serait la densité du liquide dans lequel le corps, complètement immergé, serait en équilibre? (*Bacc. Lille.*)

13. On considère un plan incliné; son profil est le suivant : longueur AB suivant la ligne de plus grande pente; le point le plus haut B au-dessus de l'horizontale passant par A se projette en C sur celle-ci.

$$\widehat{BAC} = \alpha.$$

1° Une sphère pesant 400 gf posée sur le plan AB est retenue par un fil dirigé suivant la ligne de plus grande pente; il s'enroule sur la gorge d'une poulie d'axe horizontal perpendiculaire à AB, disposée au haut du plan incliné. A l'autre brin vertical du fil est suspendu un cylindre d'aluminium (densité : 2,60) de 10 cm² de section. L'angle α étant de 60°, calculer la hauteur h du cylindre telle que le système soit en équilibre.

2° $\alpha = 45°$. On dispose au-dessous du cylindre un vase plein d'eau posé sur un support mobile verticalement. Calculer la longueur des génératrices qui doit être immergée pour que l'équilibre soit rétabli.

3° α étant encore égal à 45°, l'on substitue à l'eau un liquide de densité inconnue D. Calculer D, sachant que la longueur immergée à l'équilibre est de 5 cm.

4° On diminue α : Trouver la valeur de BC telle qu'à l'équilibre tout le cylindre se trouve exactement immergé dans le liquide de densité D. AB = 1 m.

(*Bacc. Poitiers*, 1945.)

14. 1° Un corps de poids 30 gf flotte sans émerger dans un liquide de poids volumique 0,8 gf/cm³. Quel est le volume du corps?

2° Ce corps est un aréomètre formé de deux parties cylindriques. La plus mince qui constitue la tige de l'instrument et supporte la partie lestée, a une section de 30 mm². Dans l'eau pure à + 4 °C, l'affleurement se produit au bas de la tige. Quel est le volume de celle-ci? Quelle est sa longueur l?

3° x désignant la longueur de la partie immergée de la tige dans un liquide de poids volumique ϖ, former l'expression de x. Calculer x quand $\varpi = 0{,}9$ gf/cm³.

4° Le liquide, de poids volumique 0,9 gf/cm³, est surmonté d'une couche de 5 cm d'épaisseur d'un autre liquide, de poids volumique 0,8 gf/cm³, avec lequel il n'est pas miscible. De quelle longueur la tige de l'aréomètre émerge-t-elle au-dessus de la surface *libre* du liquide? (*Bacc. Aix*, 1945.)

DILATATIONS

15. — 1° Une tige de cuivre a 50 cm de longueur à 20°; calculer sa longueur à 100°.

2° Une sphère de cuivre a 10 cm de diamètre à 20°; calculer son volume à 300°.

3° On met en prolongement une tige de cuivre de longueur x cm et une tige de cadmium de longueur y cm. A 0°, $x + y = 100$ cm.

Quand on élève la température, l'ensemble des tiges se dilate comme une tige homogène d'étain de 100 cm de longueur à 0°. Calculer x et y.

Coefficients de dilatation linéaire : cuivre, 16.10^{-6}; cadmium, 42.10^{-6}; étain, 28.10^{-6}.

(*Bacc. Poitiers*, 1946.)

16. — 1° Deux traits tracés sur une barre d'aluminium sont séparés, à 0 °C, par une distance de 150 mm et, à 200 °C, par une distance de 150,73 mm. Calculer le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de dilatation cubique du métal.

2° Sur une tige de fer horizontale, on fixe en deux points A et B, distants de 10 cm à 0 °C, un fil d'aluminium qui, à 0 °C, s'applique exactement sur la tige. Au milieu M du fil d'aluminium, on attache un fil de coton qui passe sur une poulie de 2 mm de diamètre et qui porte un poids tenseur à son autre extrémité.

Quel déplacement subit le point M lorsque la température passe :

a) de 0° à 1 °C;

b) de 20° à 21 °C?

De quel angle tourne la poulie dans les deux cas?

Coefficient de dilatation linéaire du fer : 0,000 011.

Dans l'expression des dilatations, les termes contenant le carré du coefficient de dilatation pourront être négligés.

(*Bacc. Lyon*, 1947.

17. Un cylindre vertical, de section droite 1 cm^2, est formé de deux parties : la partie inférieure, de hauteur 4 cm, est en aluminium, de masse volumique 2,5 g/cm^3; la partie supérieure, de hauteur 20 cm, est faite d'une substance de masse volnmique 0,7 g/cm^3.

1° Déterminer la hauteur dont le cylindre s'enfonce :

a) dans l'eau;

b) dans un liquide de masse volumique 1,25 g/cm^3.

2° Quelle est la position du centre de gravité du cylindre? Vérifier que les équilibres trouvés au paragraphe précédent sont stables.

3° Le cylindre flotte sur le liquide de masse volumique 1,25 g/cm^3, dont la température est 80 °C. On laisse l'ensemble se refroidir lentement. A un certain moment, le cylindre se renverse; quelle est alors la température du liquide?

On donne : Coefficient de dilatation du liquide : $k = 0{,}001$. On négligera la dilatation des solides. (*Bacc. Nancy*, 1946.)

18. Une sphère en acier, de densité 7,71 et pesant 33,3 gf, est suspendue par un fil sous un plateau de balance. Celle-ci étant équilibrée, on immerge la sphère dans un vase contenant de l'huile de densité 0,810. Quelle charge faut-il disposer sur le plateau pour rétablir l'équilibre?

L'expérience précédente a lieu à 0 °C. On chauffe le vase à 100 °C. Sachant que le coefficient de dilatation linéaire de l'acier est $1{,}1 \times 10^{-5}$ et que, pour maintenir l'équilibre, il faut enlever 0,240 g du plateau qui soutient la sphère, déterminer le coefficient de dilatation de l'huile.

(*Bacc. Strasbourg*, 1947.)

19. 1° Une sphère solide S, de dilatation négligeable, est suspendue à l'un des plateaux d'une balance; on réalise l'équilibre en plaçant une tare convenable sur l'autre plateau. On néglige la poussée due à l'air. On plonge la sphère S dans de l'eau à 0 °C; pour rétablir l'équilibre, on est conduit à ajouter 150 g sur le plateau qui porte S. Quel est le volume de S? On prendra masse volumique de l'eau à 0 °C : 1 g/cm^3.

2° On plonge ensuite S dans de la benzine à O °C; pour rétablir l'équilibre il suffit d'ajouter 135 g sur le plateau qui porte S. Quelle est la masse volumique de la benzine à 0 °C?

3° En plongeant S dans de la benzine à 20 °C il faudrait 132 g pour rétablir l'équilibre. Quel est le coefficient de dilatation de la benzine?

4° Que trouverait-on, au paragraphe 1°, pour volume de S si l'on tenait compte de la poussée de l'air? On donne : masse volumique d'un litre d'air dans les conditions de l'expérience : 1,3 g/dm^3. (*Bacc. Nancy*, 1945.)

20. 1° Un dilatomètre est constitué par un réservoir en verre, surmonté d'un tube cylindrique gradué de 0 à 100, la division 0 étant au bas de la tige.

Vide, il pèse 15 gf.

Plein de mercure à 0 °C jusqu'à la division 10, il pèse 179,56 gf.

Plein de mercure à 0 °C jusqu'à la division 80, il pèse 189,08 gf.

Déterminer le volume du réservoir et celui d'une division de la tige à 0 °C.

Densité du mercure à 0 °C : 13,6.

2° Le dilatomètre étant rempli de mercure à 0 °C jusqu'à la division 10, on le porte à la température de 100 °C. Le mercure affleure à la division 29,6.

Quel est le coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe, sachant que le coefficient de dilatation absolue du mercure entre 0 et 100 °C est 0,000 182?

3° Le dilatomètre est rempli de benzène qui, à 0 °C, affleure à la division 6 de la tige; à 40 °C, il affleure à la division 62.

Quel est le coefficient de dilatation absolue du benzène entre 0 et 40 °C?

(*Bacc. Toulouse*, 1945.)

21. On construit un thermomètre à mercure avec un tube de verre cylindrique gradué, de longueur utile 27 cm et de section intérieure 0,05 mm^2 (mesures ramenées à 0°).

On veut qu'il indique les températures comprises entre 0° et 180 °C.

Quel doit être le volume du réservoir à 0°?

Quelle masse de mercure mettra-t-on dans l'appareil?

Quelles variations de température pourra-t-on apprécier, en admettant que l'on puisse lire facilement le demi-millimètre?

Densité du mercure à 0° : 13,6.

Coefficient de dilatation apparente du mercure : $\frac{1}{6\,400}$. (*Bacc. Lille*, 1945.)

22. 1° Un cube de silice fondue, dont la dilatation est négligeable, est suspendu à l'un des plateaux d'une balance. On réalise l'équilibre à l'aide d'une tare placée dans l'autre

plateau. On plonge le cube dans de l'eau à 0 °C. Pour rétablir l'équilibre, il est nécessaire d'ajouter 125 g du côté du cube de silice. Quels sont le volume de ce cube et la longueur de son arête? Masse volumique de l'eau à 0 °C : 1 g/cm³.

2° En plongeant le cube dans de l'alcool à 0 °C, il faut ajouter seulement 100 g pour rétablir l'équilibre. Quelle est la masse volumique de l'alcool à 0 °C?

3° En plongeant le cube dans de l'alcool à 30 °C, il faut ajouter 96,8 g pour rétablir l'équilibre. Quel est le coefficient de dilatation absolue de l'alcool?

4° On répète la dernière expérience en remplaçant le cube de silice par un cube de zinc de même arête à 0 °C. Il faut alors ajouter 97,06 g pour rétablir l'équilibre. Quel est le coefficient de dilatation linéaire du zinc? Quelle est la longueur de l'arête du cube de zinc à 30 °C?

23. Un aréomètre destiné aux liquides plus denses que l'eau affleure au point 0 dans un liquide de densité égale à 1 et au point 15 dans un liquide de densité 1,116.

1° Quel est le poids volumique d'un liquide dans lequel l'aréomètre affleure à la division 30?

2° Dans l'expérience précédente ce liquide était à la température de 0°. On recommence la mesure après l'avoir porté à 40°. L'aréomètre affleure alors à la division 26. Quel est le nouveau poids volumique du liquide?

3° Calculer, en négligeant la dilatation de l'aréomètre, le coefficient de dilatation absolue de ce liquide.

GAZ PARFAITS

24. Un tube barométrique cylindrique de 1 cm² de section, renversé verticalement sur une cuve à mercure, contient une certaine quantité d'air sec. La longueur occupée par cet air est 7,6 cm, et celle de la colonne de mercure contenue dans le tube est de 25 cm.

1° Calculer la pression de l'air contenu dans le tube, la pression atmosphérique au moment de l'expérience étant 75 cm de mercure.

2° On soulève le tube de façon que l'air occupe un volume de 30,4 cm³. Quelle est alors la hauteur de mercure dans le tube?

3° De combien a-t-on soulevé le tube?

4° Donner la masse de l'air enfermé dans la chambre barométrique, en supposant que durant l'expérience la température est demeurée constante : 20°. Masse du litre d'air dans les conditions normales : 1,293 g.

25. Un ballon sphérique, de 1 200 m³ de capacité, est gonflé avec de l'hydrogène, dont la densité par rapport à l'air est 0,07. Au niveau du sol, la pression atmosphérique est de 76 cm de mercure, et la température 0°; dans ces conditions, la masse du litre d'air est de 1,3 g. Quelle est la poussée exercée par l'air sur le ballon?

Quel poids de lest doit-on emporter pour que la force ascensionnelle au départ soit de 10 kgf? Le poids de l'enveloppe du ballon, des agrès, de la nacelle et des passagers est de 800 kgf.

Au cours de l'ascension, on jette une partie du lest. Quand le ballon cesse de monter, l'air qui l'entoure est à la température de — 10° et à la pression de 57 cm de mercure. Quel est le poids du lest qui a été jeté? On suppose invariable le poids du ballon. On sait d'autre part que la partie inférieure de l'enveloppe est munie d'une ouverture (manche) de telle sorte que le gaz contenu dans l'enveloppe est toujours à la même pression et à la même température que l'air extérieur.

Coefficient de dilatation des gaz : $\frac{1}{273}$.

26. Une éprouvette verticale cylindrique de 5 cm² de section intérieure, ouverte en bas et fermée en haut, plonge dans une cuve à mercure profonde. Le mercure s'élève dans l'éprouvette jusqu'à un niveau situé à 10 cm au-dessus du niveau extérieur. A la partie supérieure de l'éprouvette se trouve une masse d'air *m*.

1° La pression extérieure étant de 76 cm de mercure, trouver la pression de l'air dans l'éprouvette.

2° Sachant que la hauteur de la colonne gazeuse dans l'éprouvette est de 10 cm, que la température est de 15°, calculer en milligrammes la masse *m* d'air.

3° On enfonce l'éprouvette de façon que les niveaux du mercure soient les mêmes à l'intérieur et à l'extérieur de l'éprouvette. Quelle est la hauteur de la colonne gazeuse, la température étant encore de 15°? Calculer le déplacement de l'éprouvette. On supposera que le niveau de mercure reste invariable dans la cuve profonde.

On suppose connue la valeur numérique des constantes usuelles. On ne tiendra pas compte de la variation de la densité du mercure avec la température. L'air sera considéré comme un gaz parfait.

27. Dans tout le problème, la pression atmosphérique est supposée constante et égale à 75 cm de mercure.

Un tube de verre de section constante 1 cm² fermé à son extrémité supérieure est disposé sur une cuve à mercure à niveau constant, et fixé de façon que la portion émergente du tube ait 1 m de hauteur. Dans ces conditions, la hauteur du mercure dans le tube se fixe à $h = 25$ cm au-dessus du niveau de la cuve.

1° Quelle est la pression du gaz contenu dans le tube?

2° En supposant que c'est de l'air, quel est le poids d'air enfermé dans le tube?

1 litre d'air à 0 °C, sous 76 cm de mercure, pèse 1,3 gf; température du tube : 20 °C.

3° Même question en supposant que c'est de l'hydrogène qui est enfermé au-dessus du mercure. Densité de l'hydrogène par rapport à l'air : 0,07.

4° Le tube est porté à 100 °C. Quelle est la nouvelle hauteur du mercure au-dessus de la cuve? On négligera la dilatation du verre et celle du mercure.

Coefficient de dilatation du gaz, supposé parfait, sous pression constante : $\alpha = \frac{1}{273}$.

(*D'après Bacc. Toulouse.*)

28. Un tube cylindrique de longueur $l = 85$ *cm* est ouvert à ses deux extrémités; une partie de longueur $l' = 32$ *cm* est plongée verticalement dans une cuvette à mercure; on ferme alors, et l'on maintient fermé avec le doigt, l'orifice supérieur du tube, puis on l'élève verticalement tout entier jusqu'à ce que l'extrémité inférieure soit au niveau de la surface libre du mercure dans la cuvette. La distance entre les niveaux que le mercure occupe dans le tube dans la première et la seconde position est de 17 cm; calculer la pression atmosphérique H en hauteur de mercure.

Le tube étant maintenu dans la seconde position, l'orifice supérieur fermé, à quelle température t° faut-il chauffer l'air, primitivement à 15°, contenu dans le tube pour faire baisser le niveau du mercure dans le tube de 1 cm?

Coefficient de dilatation des gaz $\alpha = \frac{1}{273}$.

(*Bacc. Grenoble*, 1945.)

29. Un cylindre creux en acier, d'axe vertical, a 300 cm² de section et 50 cm de hauteur. On place à sa partie supérieure un piston pesant 6 kgf qu'on laisse s'enfoncer dans le cylindre, enfermant ainsi l'air qui y est contenu.

1° La pression atmosphérique étant 745 mm et la température 0°, calculer la masse de l'air enfermé dans le cylindre.

2° A quelle hauteur le piston s'arrêtera-t-il, la température restant constante?

3° La température est portée à 30°. Quelle masse faut-il placer sur le piston pour que celui-ci demeure à la position précédente?

Densité du mercure à 0° : 13,6, $\alpha = 1/273$.

Masse du litre d'air à 0° et sous la pression normale de 760 mm de mercure : 1,293 g.

(*Bacc. Poitiers*, 1945.)

30. Un baroscope est formé de deux sphères, l'une pleine, en cuivre, d'un volume de 10 cm³, l'autre creuse, d'un volume de 100 cm³, suspendues à égale distance du couteau central d'un fléau de balance.

1° Le baroscope est à l'équilibre dans l'air à 760 mm et 0°. Calculer la masse de la sphère creuse.

2° On place le baroscope dans l'air à 15° sous 760 mm. Dans quel sens s'incline-t-il? Quelle force faut-il appliquer à la distance d du couteau central pour rétablir l'équilibre?

3° Mêmes questions pour le baroscope dans l'air à 0° et sous 7 0 mm.

4° Mêmes questions pour le baroscope dans une atmosphère formée d'oxygène pur à 0° et sous 760 mm.

On donne : masse volumique du cuivre; 8,8 g/cm³; masse du litre d'air à 0° sous 760 mm : 1,29 g; coefficient de dilatation des gaz : 1/273; $O_2 = 32$.

CALORIMÉTRIE

31. Pour connaître la température d'un four industriel, on y plonge un anneau de fer de masse 22,3 g. Au bout d'un certain temps, lorsqu'il a atteint la température du four, on le plonge rapidement dans un calorimètre contenant 450 g d'eau à 15 °C. Après agitation, la température de l'eau monte jusqu'à 22,5 °C.

1° On demande la température du four, sachant que la chaleur massique du fer à l'état solide est 0,114.

2° Voulant connaître la chaleur massique d'un liquide, on remplace l'eau du calorimètre par 100 g de ce liquide à la température ambiante de 15 °C. L'anneau de fer précédent, ayant été chauffé à 100 °C, est ensuite plongé dans le liquide, dont la température s'élève à 19,1 °C.

On demande cette chaleur massique.

3° On n'a tenu aucun compte, aux 1° et 2°, de la capacité calorifique du vase calorimétrique. En le supposant formé d'un récipient en cuivre de masse 200 g, de chaleur massique 0,1, refaire les calculs de la température du four et de la chaleur massique du liquide pour se rendre compte des erreurs précédemment commises, que l'on évaluera correctement.

On négligera la capacité calorifique du thermomètre et celle de l'agitateur, ainsi que les pertes par rayonnement.

(*Bacc. Rome*, 1946.)

32. 1° On introduit dans un calorimètre contenant M = 200 g d'eau à la température $\theta = 16°256$ une masse d'eau $m = 100$ g à une température $t = 30°500$. La température finale est $\theta_1 = 20°704$.

Calculer la valeur en eau μ du calorimètre

2° Ce même calorimètre sert à mesurer la chaleur massique c d'un liquide L. Celui-ci de masse $M' = 150$ g est préalablement porté à une température $T = 42°348$. Il est ensuite vidé brusquement dans le vase calorimétrique contenant Mg d'eau à $\theta = 16°252$. La température de l'eau croît et se fixe à $\theta_2 = 22°474$.

Calculer c.

3° On cherche à améliorer le résultat précédent, en tenant compte des pertes calorimétriques.

On suit la marche du thermomètre durant les 10 minutes qui précèdent l'introduction du liquide L. La température passe régulièrement de $t_0 = 16°424$ à θ_0.

L'expérience proprement dite a une durée de 4 minutes; la température finale est θ_2.

On note enfin la température $\theta'_2 = 22°262$ dix minutes après la fin de l'expérience.

Évaluer le refroidissement $\Delta\theta$ dû aux fuites thermiques pendant l'expérience.

(On admettra que le refroidissement par minute pendant l'expérience est égal à la valeur moyenne du refroidissement par minute pendant les 20 minutes d'observations complémentaires). Établir la nouvelle équation calorimétrique en tenant compte du terme $\Delta\theta$ et en déduire une valeur plus précise de c.

N. B. — La chaleur massique de l'eau sera constamment considérée comme égale à 1.

(*Bacc. Toulouse*, 1945.)

33. 1° Un cylindre d'invar de masse 324 g subit de la part d'un liquide L une poussée égale à 50,28 gf à la température de 25° et à 48,48 gf à 100°. Le même cylindre plongé dans l'eau à 4° subit une poussée de 40,00 gf.

Calculer le poids volumique du liquide à 25° et à 100°, ainsi que son coefficient moyen de dilatation dans cet intervalle de température. On ne tiendra pas compte de la dilatation très faible de l'invar.

2° Le cylindre est porté à 100°, puis plongé dans un calorimètre de valeur en eau 20 g, contenant 400 cm³ du liquide L à 25°. La température finale d'équilibre est 32°,7. On répète la même expérience en remplaçant le cylindre d'invar par 200 cm³ d'eau prise à 4°; la température d'équilibre est alors 16°,8. On demande de déterminer les chaleurs massiques de l'invar et du liquide L.

34. Dans un calorimètre de Berthelot, à la température ambiante de 15°,5 C, on verse 90 cm³ d'eau tiède à 25°. La température d'équilibre est de 24°,5. Calculer la masse en eau du calorimètre.

Immédiatement après, on plonge dans le calorimètre 125 g de platine sortant d'une étuve à 103°,7. La nouvelle température d'équilibre est de 27°,7. Calculer la chaleur massique du platine.

On ajoute ensuite 23 cm³ d'eau prise à la température ambiante. Quelle est la nouvelle température d'équilibre?

CHANGEMENTS D'ÉTAT

35. Un calorimètre constitué par un vase, un agitateur et un thermomètre contient initialement 200 g d'eau à 20 °C. On verse 250 g d'eau bouillante sous pression normale et on note une température finale de 60 °C.

1° Quelle est la « masse en eau » du vase et de ses accessoires?

2° On utilise ce calorimètre pour déterminer la chaleur massique d'un métal. A cet effet, on verse 200 g d'eau dans le vase, on note la température initiale égale à 20 °C, et on ajoute 100 g du métal préalablement portés à la température 100 °C. La température finale est 23 °C. Quelle est la chaleur massique de ce métal?

3° On veut déterminer la chaleur de fusion de la glace. Le vase contient initialement 400 cm³ d'eau et sa température est 20 °C. On introduit 5 g de glace à 0° C et on note la température finale de 10 °C. En déduire la chaleur de fusion de la glace.

4° Quelle aurait été la température finale si l'on avait introduit une masse de 150 g de glace à 0 °C? (*Bacc. Alger*, 1947.)

36. Un cube de glace de 3 cm d'arête flotte sur de l'eau pure à la température de 0 °C. La densité de la glace à 0 °C est égale à 0,92.

1° Quelle est la hauteur d'arête immergée? Quel poids faut-il appliquer sur la face supérieure du cube pour l'immerger totalement dans l'eau pure? (On supposera qu'un cm³ d'eau à 0° pèse 1 gf).

2° Pour immerger ce cube dans une solution saline à 0° on a dû appliquer sur sa face supérieure un poids de 7,56 gf. Quelle est la densité de cette solution? Quelle sera la hauteur du cube immergée dans la solution saline si on supprime l'action de ce poids?

3° Ce même cube de glace est plongé dans un calorimètre. Le vase calorimétrique et ses accessoires sont en laiton et pèsent 120 gf; la chaleur massique du laiton est égale à 0,1. Le calorimètre renferme 500 g d'eau à la température de 15°00. Sachant que la chaleur de fusion de la glace est égale à 80 calories, calculer la température finale du calorimètre après fusion complète du cube de glace. Quelle erreur ferait-on sur cette température en négligeant la capacité calorifique du vase calorimétrique et de ses accessoires?

(*Bacc. Bordeaux*, 1945.)

37. 1° Un bloc de glace homogène de 100 g flotte sur de l'eau à 0°; quel est le volume de la partie de ce bloc située hors de l'eau?

2° On introduit dans le récipient un morceau de métal de masse 150 g et porté à 100°.

Quelle est la quantité de glace qui fond?

Quelle est la diminution de volume du mélange glace-eau?

(On suppose que l'isolement thermique du vase est parfait.)

Masse volumique de la glace : 0,92 g/cm³.

Chaleur de fusion de la glace : 80 calories.

Chaleur massique du métal : 0,12 calorie.

(*Bacc. Besançon*, 1945.)

38. 1° Un calorimètre en laiton contient 150 g d'eau à la température de 15°. On ajoute 100 g d'eau à la température de 50°, ce qui porte, après agitation, la température de l'ensemble à 28°. La chaleur massique du laiton est 0,09. Quel est la masse du calorimètre?

2° Dans le même calorimètre contenant 200 g d'eau à 15°, on plonge un morceau de métal préalablement porté, dans une étuve, à la température de 100°. La température s'élève, après agitation, à 22°,8. Le morceau de métal pèse 200 gf. Calculer sa chaleur massique.

3° Dans le même calorimètre contenant 400 g d'eau à 20°, on introduit 30 g de glace à la température de 0°. Quelle sera la température atteinte, après agitation, lorsque toute la glace sera fondue? Chaleur latente de fusion de la glace : 80.

39. Un vase métallique d'un kilogramme, dont la chaleur massique est 0,10, renferme 6 kg de mercure. La température du vase et du mercure est — 30°. On introduit d'abord dans le vase 100 g d'eau à la température + 90°. Calculer la température finale. On introduit ensuite 500 g d'un corps que ni l'eau ni le mercure n'altèrent. Ce corps, de chaleur massique c, est à la température t_1. La température finale est t_2.

1° On donne $t_1 = +90°$ et $t_2 = +10°$ Calculer c.

2° On donne $t_1 = -50°$ et l'on prend pour c la valeur précédemment trouvée. Calculer t_2.

La chaleur massique du mercure sera prise égale à $\frac{1}{30}$.

Pour faire passer 1 g d'eau liquide à 0° à l'état solide, sans changement de température, il faut lui enlever 80 calories.

(*D'après Bacc. Strasbourg.*)

40. Un récipient cylindrique fermé dans lequel on a fait le vide est maintenu à la température constante de 100°. Il est divisé en deux compartiments A et B par un piston mobile sans frottement. Chaque compartiment a 1 m de longueur et une section de 1 m².

1° Calculer la quantité d'eau qu'il faut introduire dans l'un des compartiments pour que la vapeur d'eau soit saturante sans excès de liquide.

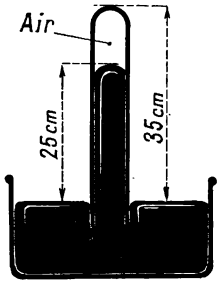
2° On a introduit 200 g d'eau dans A et 2 kg d'eau dans B. Calculer la force qui agit sur le piston.

3° Le piston est rendu libre. Déterminer sa position d'équilibre.

Densité de la vapeur d'eau : 0,625. Masse du litre d'air à 0° sous 76 cm : 1,3 g.

(*Bacc. Caen*, 1946.)

41. Un tube barométrique cylindrique de 1 cm³ de section est renversé verticalement sur une cuve profonde à mercure de niveau



constant. De l'air sec est enfermé dans le tube. Dans sa position initiale, le haut du tube est à 35 cm de la surface libre du mercure dans la cuve et le mercure s'élève dans le tube à 25 cm au-dessus de cette surface libre. La température est 17 °C.

1° De quelle hauteur faut-il soulever verticalement le tube pour que le volume de l'air devienne 11 cm³?

2° Le tube ramené à sa position initiale est maintenu immobile; à quelle température faudrait-il porter l'air intérieur pour que son volume devienne 11 cm³? Si cet air était porté à 37 °C, quel volume occuperait-il?

3° Le tube étant encore à sa position initiale et la température ramenée à 17 °C, on introduit de l'éther goutte à goutte dans la chambre d'air. Indiquer les observations que l'on fera. A quel niveau va se fixer le mercure?

Pression atmosphérique : 76 cm de mercure. Tension maximum de l'éther à 17 °C : 41 cm de mercure. Coefficient de dialatation des gaz : $\alpha = \frac{1}{273}$. (*Bacc. Paris*, 1946.)

42. Un cylindre d'axe vertical C est fermé par un piston léger P. Il contient initialement 5 kg d'eau à 15 °C et le piston repose sur l'eau.

1° Exprimer la force totale qu'exerce sur le piston la pression atmosphérique.

Surface du piston : 25 dm²; pression atmosphérique : 760 mm de mercure; densité du mercure : 13,6.

2° On chauffe l'eau et on en vaporise 100 g. On demande de calculer en kilogrammètres le travail produit dans la montée du piston.

Volume molaire normal : 22,4 dm³.

La vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait; coefficient de dilatation : $\frac{1}{273}$.

On demande la chaleur fournie au système dans cette opération.

Chaleur massique de l'eau de 0° à 100 °C : $c = 1$ kilocalorie par kilogramme. Chaleur de vaporisation de l'eau à 100 °C : L = 538 kilocalories par kilogramme.

3° On injecte ensuite dans le cylindre de l'eau à 15 °C. La vapeur se condense et le piston redescend. On demande la quantité totale d'eau qu'il faut ajouter pour que le cylindre ne renferme plus que de l'eau à 50 °C.

N. B. — On néglige la capacité calorifique du cylindre et du piston.

(*D'après Bacc. Clermont*, 1945.)

43. Un cylindre vertical de 200 cm² de section est fermé par un piston de poids négligeable, mobile sans frottement à l'intérieur du cylindre. Sur le piston s'exerce la pression atmosphérique H = 75 cm de mercure. Le cylindre contient de l'air sec à la température de 15 °C et le piston se trouve à 25 cm du fond.

1° Quel est la masse de l'air contenu dans le cylindre?

2° On porte le cylindre à 50 °C, la pression restant constante. Quelle position prend le piston? On négligera la dilatation du cylindre.

3° La température restant égale à 50 °C, on introduit de l'eau en quantité juste suffisante pour qu'elle donne de la vapeur saturante. Quelle est la nouvelle position du piston?

4° On place alors sur le piston une masse de 25 kg. Que devient la pression dans le cylindre? Quelle est la position prise par le piston et quelle est la fraction de vapeur d'eau qui s'est condensée?

Coefficient de dilatation des gaz : $\alpha = 1/273$. Masse du litre d'air dans les conditions normales : 1,3 g. Masse volumique du mercure : 13,6 g/cm³. Pression maximum de la vapeur d'eau à 50 °C : 92 mm de mercure.

(*D'après Bacc. Grenoble*, 1946.)

44. Un calorimètre en laiton de masse 300 g contient 470 g d'eau. Un bloc de glace homogène de masse 200 g flotte à la surface de l'eau. L'ensemble est à la température 0 °C.

1° Calculer le volume de glace qui émerge de l'eau.

2° On introduit dans le calorimètre un bloc d'aluminium de masse 100 g et porté à 100 °C. Calculer la masse de glace qui fondra.

3° On fait maintenant arriver dans le calorimètre 50 g de vapeur d'eau saturante à 100 °C. Calculer la température finale.

Données : masse volumique de la glace : 0,92 g/cm³; masse volumique du laiton : 10 g cm³ chaleur massique de l'aluminium : 0,212 cal/g.° chaleur de fusion de la glace : 80 calories par gramme; chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100 °C : 539 calories par gramme.

NOTICES BIOGRAPHIQUES

AMPÈRE (André-Marie) (1775-1836). Né à Lyon; mort à Marseille.

Illustre mathématicien et physicien français. Montra dès son enfance des dispositions remarquables pour les mathématiques, s'occupa tour à tour avec succès de science, poésie, littérature, philosophie. Surtout célèbre par ses travaux en Électricité. En Chimie, il fut en France un chaleureux défenseur de la théorie atomique due au savant italien Avogadro.

D'ARSONVAL (Arsène) (1851-1941). Né à La Porcherie (Haute-Vienne).

Biologiste et physicien français. Très habile expérimentateur, il a fait faire d'importants progrès à l'électricité médicale.

ARCHIMÈDE (287-212 av. J.-C.). Né et mort à Syracuse.

Le plus célèbre mathématicien de l'antiquité. On lui doit de très importantes découvertes en Géométrie, Mécanique et Physique. On voit en lui le fondateur de la Statique (science de l'équilibre), le principe qui porte son nom fut énoncé dans son *Traité des corps flottants.*

AVOGADRO (Amedeo) (1776-1856).

Chimiste italien. Il formula le premier l'hypothèse suivante : Des volumes égaux de tous les gaz, pris dans les mêmes conditions, renferment le même nombre de molécules (hypothèse d'Avogadro).

BAUMÉ (1728-1804).

Chimiste français, né à Senlis.

BERTHELOT (Marcelin) (1827-1907). Né et mort à Paris.

Célèbre chimiste français. Auteur de nombreuses synthèses de corps fondamentaux en Chimie Organique. Il a mesuré un très grand nombre de quantités de chaleur dégagées dans les réactions chimiques dont il voulait étudier le mécanisme.

BERTHOLLET (Jean-Claude) (1749-1822). Né à Talloires; mort à Arcueil.

Médecin, puis chimiste. Accompagna Bonaparte en Égypte. Connu pour ses travaux de chimie industrielle (blanchiment et teinture) et théorique (règles de Berthollet).

BORDA (Jean-Charles) (1733-1799). Né à Dax; mort à Paris.

D'abord officier du Génie, puis marin; mathématicien et physicien. Étudia le mouvement des projectiles. Il fit faire de nombreux progrès à la navigation scientifique, contribua à l'établissement du nouveau système des poids et mesures (Système métrique). Un navire école de la marine française porta longtemps le nom de « Borda ».

BOURDON (Eugène) (1808-1884). Né et mort à Paris.

Ingénieur et constructeur français.

CAILLETET (Louis-Paul) (1832-1913). Né à Châtillon-sur-Seine (Côte-d'Or).

Physicien et industriel français connu par ses études sur la fabrication de l'acier, et surtout par ses recherches sur la liquéfaction des gaz.

CELSIUS (André) (1701-1744).

Astronome allemand, eut le premier en 1742 l'idée de l'échelle thermométrique centésimale, et en proposa l'adoption.

CHARLES (Jacques-Alexandre) (1746-1822). Né à Beaugency, mort à Paris.

Expérimentateur très habile. Étudia l'influence de la température sur les propriétés des gaz. Au cours de nombreuses ascensions, il perfectionna la technique des ballons sphériques.

DALTON (Jean) (1766-1844). Né à Eaglesfield; mort à Manchester.

Physicien, chimiste et naturaliste anglais. Effectua des travaux importants sur les fluides, les chaleurs spécifiques, la vision (daltonisme). Apporta des perfectionnements à la théorie atomique.

DEWAR (James) (1842-1923).

Physicien et chimiste anglais, auteur de travaux sur les basses températures.

DULONG (Pierre-Louis) (1785-1838). Né et mort à Paris.

Physicien et chimiste français, il étudia également la médecine. Ses travaux se rapportent surtout à la Chaleur.

FAHRENHEIT (Daniel) (1686-1736).

Physicien allemand. Inventeur d'un aréomètre et de la graduation thermométrique qui porte son nom, il perfectionna les thermomètres.

FONTENELLE (Bernard) (1657-1757). Né à Rouen; mort à Paris.

Écrivain français. L'intérêt qu'il portait aux questions scientifiques le fit choisir comme secrétaire de l'Académie des Sciences.

GAUSS (Karl-Frédéric) (1777-1855). Né et mort à Brunswick.

Astronome, mathématicien et physicien allemand. Universellement connu pour ses recherches sur le mouvement des corps célestes, en Optique, Magnétisme, Électricité.

GAY-LUSSAC (Joseph-Louis) (1776-1850). Né à Saint-Léonard (Haute-Vienne); mort à Paris.

Célèbre physicien et chimiste français. D'une très grande habileté expérimentale, il perfectionna le baromètre, découvrit en Chimie les lois volumétriques qui portent son nom et en Physique la loi de la dilatation des gaz.

GUERICKE (Otto de) (1602-1686). Né à Magdebourg; mort à Hambourg.

Savant allemand, bourgmestre de Magdebourg. Il construisit la première machine pneumatique.

GUILLAUME (Charles-Édouard) (1861-1938). Né à Fleurier (Suisse).

Physicien français. Fut directeur du Bureau International des Poids et Mesures, et contribua à la diffusion du Système Métrique dans le monde. Inventeur des alliages invar et élinvar.

HOPE (Thomas-Charles) (1766-1844).

Savant anglais connu pour ses travaux en Chimie, et sur la contraction de l'eau aux basses températures.

JOULE (James-Prescott) (1818-1889).

Physicien anglais. Étudia l'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique et découvrit la loi du dégagement de la chaleur dû au passage du courant électrique.

KELVIN (Lord) (Sir William Thomson) (1824-1907).

Physicien anglais. Auteur de nombreuses recherches en Chaleur et Magnétisme. Promoteur de l'échelle absolue des températures. Reçut le titre de Lord pour l'ensemble de son œuvre scientifique.

MARIOTTE (Abbé Edme) (1620?-1684). Né à Dijon (?); mort à Paris.

Fondateur, en France, de la Physique expérimentale. Fit partie de l'Académie des Sciences dès sa fondation en 1666. On lui doit des travaux importants en Mécanique et en Hydrostatique.

NEWTON (Isaac) (1642-1727). Né à Woolstorpe; mort à Londres.

Illustre mathématicien et physicien; un des esprits les plus puissants de la Science. A laissé des découvertes fondamentales en Astronomie, Mécanique, Optique, Chaleur.

PASCAL (Blaise) (1623-1662). Né à Clermont-Ferrand.

Mathématicien, physicien, philosophe et écrivain français. Esprit puissant, attiré par de nombreux problèmes scientifiques, notamment l'*équilibre des liquides* (un des fondements de l'Hydrostatique). Il imagina la presse hydraulique. Dans le domaine pratique on lui prête également l'invention de la brouette, du haquet, des omnibus....

PETIT (Alexis) (1791-1820). Né à Vesoul; mort à Paris.

Physicien français. Eut une jeunesse scolaire très brillante. Prit une part active aux travaux de Dulong et fit des recherches en Mécanique appliquée.

RÉAUMUR (René-Antoine de) (1683-1757). Né à La Rochelle.

Physicien et naturaliste français. Prit une part importante au perfectionnement des thermomètres.

REGNAULT (Henri-Victor) (1810-1878). Né à Aix-la-Chapelle; mort à Paris.

Ingénieur et physicien français. Auteur de remarquables travaux de physique expérimentale, surtout dans les domaines de la Chaleur (détermination des coefficients α et β) et de l'Acoustique.

ROBERVAL (Gilles de) (1602-1675). Né à Roberval (Oise); mort à Paris.

Géomètre français, auteur de travaux de mathématiques pures. En mécanique appliquée, inventeur de la balance.

STEVIN (Simon) (1548-1620). Né à Bruges; mort à Leyde.

Mathématicien et ingénieur hollandais, connu par ses travaux de Mécanique et d'Hydrostatique.

TORRICELLI (Evangelista) (1608-1647). Né à Faënza; mort à Florence.

Physicien et mathématicien italien, élève de Galilée. Inventa le baromètre en 1643. Auteur de travaux importants sur l'écoulement des liquides et de divers perfectionnements à la lunette et aux microscopes.

TYNDALL (John) (1820-1893).

Ingénieur, puis professeur anglais. Vulgarisateur de grand talent. Alpiniste de valeur, a étudié maintes fois sur place les phénomènes naturels dans les montagnes (neige, brouillard, glace et glaciers).

WATT (James) (1736-1819).

Mécanicien écossais. Tour à tour géomètre, arpenteur et constructeur d'appareils, il a apporté de très nombreux perfectionnements à la machine à vapeur.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT 3
RAPPEL DE MATHÉMATIQUES 4

FORCE, PUISSANCE ET TRAVAIL, PESANTEUR 9
1. Différents états de la matière 10
2. Forces 16
3. Composition des forces 31
4. Moment d'une force. Couple 42
5. Verticale. Centre de gravité. Équilibres 53
6. Travail. Puissance 68
Lecture : Le travail 81
7. Machines simples 82
8. Notion de masse 102
9. La balance 109
10. Masse volumique. Poids volumique. Densité 127

STATIQUE DES FLUIDES 135
11. Pressions 136
12. Principe fondamental de l'Hydrostatique 143
13. Applications du Principe fondamental 149
14. Applications du Principe fondamental 151
15. Aérostatique (statique des gaz) 177
16. Pression atmosphérique 186
17. Baromètres 193
Lecture : Pascal et l'horreur du vide 200
18. Manomètres 203

CHALEUR 211
19. Température. Thermomètre 213
20. Dilatation des solides et des liquides 229
21. Étude expérimentale des gaz 247
22. Le gaz parfait. Équation caractéristique 264
23. Calorimétrie 278
24. Fusion et solidification 293
Lecture : Le regel de la glace 300
25. Vaporisation et liquéfaction 302
Problèmes 322
Notices biographiques 332

Imprimé en France par BRODARD-TAUPIN, Imprimeur-Relieur. Coulommiers-Paris.
Dépôt légal : N° 3109. 4e trimestre 1958. — 53992-11-1958.